



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Joakim Tikkanen

CSS-ÄÄNENVAIMENTIMEN SUORITUSKYVYN TARKASTELU

Wärtsilä

Tekniikka
2018

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Joakim Tikkanen
Opinnäytetyön nimi	CSS-äänenvaimentimen suorituskyvyn tarkastelu
Vuosi	2018
Kieli	suomi
Sivumäärä	54 + 2 liitettä
Ohjaaja	Marko Rantasalo

Opinnäytetyössä tutkittiin laivan äänenvaimentimen suunniteltua ja toteutunutta suorituskkyä. Äänenvaimentimien suunnittelun onnistuminen on tärkeää tehokkaan vaimennuksen saavuttamiseksi. Tavoitteena oli selvittää, vastaako mittaustulokset haluttuja ja suunniteltuja arvoja, sekä pohtia mahdollisia syitä mikäli tulokset eivät ole tyydyttäviä. Opinnäytetyö tehtiin Wärtsilän teknisen huollon Vibration & Environmental Technologies -osastolle.

Tutkimuksessa haluttiin selvittää Compact Silencer System -äänenvaimentimen neljännesaaltoresonaattoreiden toimivuus viritystaajuuksilla sekä niiden monikerroilla. Vaimennustaso saatiin selville mittaamalla laivan dieselmoottorin aiheuttama pakomelu ennen ja jälkeen vaimentimen asennuksen. Tutkimus oli laadultaan kvalitatiivinen, sillä työssä analysoitiin ainoastaan yhden vaimentimen mittaustuloksia.

Tulokset osoittivat, että kolmesta neljännesaaltoresonaattorista kaksi toimi suunnitellusti, mutta yksi ei. Työssä pohdittiin myös mittaustuloksiin vaikuttavia tekijöitä. Neljännesaaltoresonaattoreiden viritystaajuuksien suunnittelu osoittautui silti onnistuneeksi, sillä vaimennus toteutui halutuilla taajuuksilla.

ABSTRACT

Author	Joakim Tikkanen
Title	Performance Analysis of a CSS-silencer
Year	2018
Language	Finnish
Pages	54 + 2 Appendices
Name of Supervisor	Marko Rantasalo

The subject of this thesis was to investigate and compare the designed and measured attenuation of a silencer. The successful design of silencers is important for achieving effective attenuation. The aim was to find out whether the measurement results met the desired and planned values, and to consider the possible causes if the results were not satisfactory. This thesis was made for Wärtsilä's Technical Services Vibration & Environmental Technologies department.

The purpose was to find out the performance of the quarter-wave resonators of the Compact Silencer System at their tuning frequency and odd multiplies of the tuning frequency. The attenuation level was found by measuring the exhaust noise before and after the installation of the muffler. The research was a qualitative analysis, as only one muffler was analyzed.

The results showed that out of three quarter-wave resonators two worked as planned and one did not. The factors that influenced the measurement were also considered in the thesis. The calculation of the quarter-wave resonators tuning frequencies was still successful, as the attenuation was achieved at the desired frequencies.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

LYHENTEET JA TERMIT

1	JOHDANTO	11
2	YRITYSESITTELY	12
	2.1 Wärtsilän historia	12
	2.2 Wärtsilä nykyään.....	12
	2.3 Marine Solutions	13
	2.4 Energy Solutions	14
	2.5 Services.....	14
3	ÄÄNI	15
	3.1 Voimakkuus.....	15
	3.2 Taajuus	15
	3.3 Ihmisen kuulo.....	16
4	YMPÄRISTÖMELU	17
	4.1 Meluindikaattorit.....	17
	4.2 Melun terveysvaikutukset.....	18
5	DIESELMOOTTORIN PAKOMELUN VAIMENNUS	20
	5.1 Dieselmoottorin aiheuttama pakomelu.....	20
	5.2 Resisttiiviset äänenvaimentimet.....	21
	5.2.1 Absorptiovaimennin.....	21
	5.3 Reaktiiviset äänenvaimentimet	21
	5.3.1 Neljännesaaltoresonaattori	22
	5.3.2 Laajennuskammio	23
	5.3.3 Helmholtz-resonaattori.....	23
6	ÄÄNENVAIMENTIMEN SUUNNITTELU	24
	6.1 Päätykorjaus.....	25
	6.2 Compact Silencer System.....	26
7	VAIMENTIMEN SUORITUSKYVYN ARVIOINTI.....	29

7.1	Cold verification	29
7.2	Hot verification	29
7.3	Vaimentimen suorituskkyä kuvaavat suureet	29
7.3.1	Insertion Loss	30
7.3.2	Transmission Loss	30
7.3.3	Noise Reduction	30
7.4	Mittaus putken pään ulkopuolelta	31
8	TROOLARI	33
8.1	Taustatietoa.....	33
8.2	Mittauslaitteet	34
8.2.1	Laivalla käytetyt mittauslaitteet.....	34
8.2.2	Tehtaalla käytetyt mittauslaitteet.....	35
8.3	Alkuperäisen melutason mittaus yhdellä äänenvaimentimella.....	35
8.3.1	Mittaukset	36
8.4	Uusi CSS-äänenvaimennin	42
8.4.1	Kylmävierifiinnin mittaukset	43
8.5	Lopullisen melutason mittaus kahdella äänenvaimentimella	44
8.5.1	Kuumävierifiinnin mittaukset	44
8.6	Vertailu	46
9	YHTEENVETO JA ARVIOINTI	52
9.1	Mittauksien yhteenveto	52
9.2	Työn yhteenveto.....	52
9.3	Arviointi.....	53
	LÄHTEET	54

LIITTEET

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Wärtsilän henkilöstömäärä vuonna 2016.	13
Kuvio 2. Wärtsilän liikevaihto vuonna 2016.	13
Kuvio 3. A-painotettu taajuuskäyrä.	18
Kuvio 4. A-painotettu 30 sekunnin 1/3-oktaavianalyysi yhdellä vaimentimella mittauspisteistä 5, 8, 9 ja 10.	37
Kuvio 5. A-painotettu 30 sekunnin 1/3-oktaavianalyysi yhdellä vaimentimella mittauspisteistä 9, 10, 11 ja 12.	39
Kuvio 6. A-painotettu 30 sekunnin 1/3-oktaavianalyysi yhdellä vaimentimella mittauspisteistä 13, 14 ja 15.	42
Kuvio 7. A-painotettu 30 sekunnin 1/3-oktaavianalyysi kahdella vaimentimella mittauspisteistä 9, 10, 11 ja 12.	45
Kuvio 8. A-painotettu 30 sekunnin 1/3-oktaavianalyysi kahdella vaimentimella mittauspisteistä 13, 14 ja 15.	46
Kuvio 9. Vanhat ja uudet mittaukset A-painotettuina pisteistä 5 ja 8.	47
Kuvio 10. Vanhat ja uudet mittaukset lineaarisina pisteistä 5 ja 8.	48
Kuvio 11. Muutos kokonaisäänenpainetasossa pisteissä 3–8.	49
Kuvio 12. Muutos kokonaisäänenpainetasossa pisteissä 9–12.	50
Kuvio 13. Muutos kokonaisäänenpainetasossa pisteissä 13–15.	51
 Kuva 1. Reaktiiviset vaimentimet: (a) laajennuskammio, (b) laajennuskammio pidennetyllä sisääntuloputkella, (c) Helmholtz-resonaattori ja (d) neljännesaaltoresonaattori. /8/	22
Kuva 2. Päätykorjaus. /3/	25
Kuva 3. Laivamoottorin vaimennintoteutuksia. Vasemmalla tavallinen ja oikealla CSS. /8/	27
Kuva 4. CSS-järjestelmissä käytettyjä tyypillisiä vaimenninelementtejä. (a) Reaktiivinen neljännesaaltoresonaattori, (b) resistiivinen elementti korkeiden taajuuksien vaimennukseen, ja (c) kolmoiselementti. /9/	28
Kuva 5. Äänen intensiteetti vähenee yhdeksäsosaan, kun etäisyys kolminkertaistuu. /3/	31
Kuva 6. Troolari. /11/	33

Kuva 7. RION NA-28. /12/	34
Kuva 8. Brüel & Kjær 4231. /13/	34
Kuva 9. Pakoputken pään sijainti.	35
Kuva 10. Mittauspisteet 5 ja 8.	36
Kuva 11. Mittauspisteet 9 ja 10.	36
Kuva 12. Mittauspisteet 11 ja 12.	38
Kuva 13. Mittauspisteet 13, 14 ja 15 komentosillalla.	41
Kuva 14. Uuden CSS-vaimentimen mittaus valkoisella kohinalla.	43
Taulukko 1. Ympäristömelun vaikutukset terveyteen ja hyvinvointiin.	19

LIITELUETTELO

LIITE 1. FFT-data mittauspisteestä 3

LIITE 2. FFT-data mittauspisteestä 8

LYHENTEET JA TERMIT

Bar	Baari, paineen yksikkö
CSS	Compact Silencer System
dB	Desibeli, äänenvoimakkuuden mittayksikkö
dB(A)	A-painotettu desibeli, ihmisen kuuloalueen mukaan taajuuspainotettu äänenvoimakkuuden yksikkö
DF	Dual Fuel (Engine), kaksoispolttoaine(moottori)
EGT	Exhaust Gas Temperature, pakokaasun lämpötila
EU	Euroopan unioni
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä, jota käytetään pääosin lujuuslaskennassa. Tunnetaan myös nimellä FEA (Finite Element Analysis)
FFT	Fast Fourier Transform, nopea Fourier'n muutos, joka on tehokas algoritmi diskreetin Fourier'n muunnoksen ja sen käänteismuunnoksen laskemiseen
Hz	Hertsi, taajuuden yksikkö
IL	Insertion Loss, kytkentähäviö
ISO	International Organization for Standardization, kansainvälinen standardoimisjärjestö
kW	Kilowatti, tehon yksikkö
Kynnystaso	Taso, jonka yläpuolella vaikutus alkaa ilmetä tai ilmenee tavanomaista useammin

LNG	Liquefied Natural Gas, nesteytetty maakaasu
MDO	Marine Diesel Oil, meridieselöljy
ME	Main Engine, päämoottori
MW	Megawatti, tehon yksikkö
NR	Noise Reduction, melun vähennys
Oyj	Julkinen osakeyhtiö
RPM	Revolutions Per Minute, kierrosnopeuden yksikkö
SCR	Selective Catalytic Reduction, selektiivisen katalyyttisen pelkistuksen puhdistusjärjestelmä typen oksidien poistamiseksi pakokaasuista
TL	Transmission Loss, siirtohäviö
W32	Wärtsilä 32 -moottori

1 JOHDANTO

Kiristyvät meluvaatimukset yhdessä kiristyvien päästövaatimusten kanssa aiheuttavat haasteita laiva- ja voimalaitosmoottoreiden osalta. Pakoputkiston kasvava monimutkaisuus aiheuttaa vastapaineen kasvua, mikä vaikuttaa suoraan järjestelmän käyttökustannuksiin ja tehokkuuteen.

Opinnäytetyön aiheena on matalaan painehäviöön kykenevä Compact Silencer System -äänenvaimennin, joka asennettiin liikaa melua aiheuttavaan laivaan. CSS-äänenvaimentimen suunnittelu on hyvin tarkkaa, sillä pienetkin virheet viritystaaajuuden suunnittelussa aiheuttavat vaimennuskaistan siirtymisen ja sitä kautta vaimennustason heikkenemisen.

Työssä perehdytään myös äänen, äänenvaimennuksen ja melumittauksen teoriaan, jotta lukija saisi paremman ymmärryksen työn sisällöstä. Työn tavoitteena oli selvittää, vastaako mittaustulokset haluttuja ja suunniteltuja arvoja, sekä pohtia mahdollisia syitä, mikäli tulokset eivät ole tyydyttäviä.

2 YRITYSESITTELY

Wärtsilä Oyj Abp on merenkulku- ja energiamarkkinoille edistyksellistä teknologiaa ja elinkaariratkaisuja toimittava kansainvälinen yritys. Wärtsilä keskittyy kestäviin innovaatioihin ja kokonaishyötysuhteeseen maksimoiden asiakkaiden alusten ja voimalaitosten ympäristötehokkuuden ja taloudellisuuden. /1/

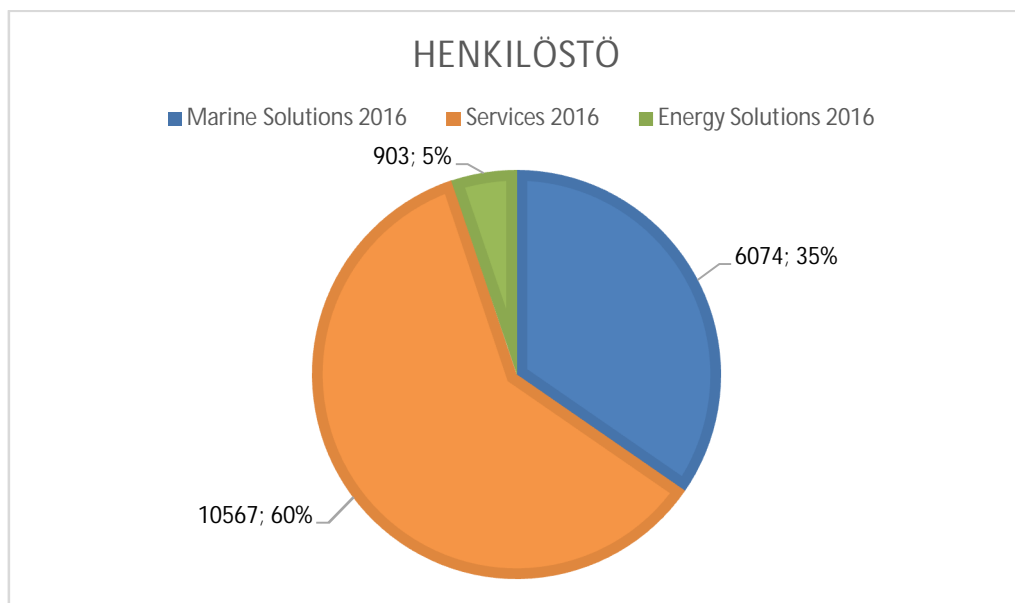
2.1 Wärtsilän historia

Wärtsilä perustettiin Tohmajärven kunnassa vuonna 1834, kun Karjalan läänin maaherra antoi oikeuden sahan rakentamiseen. 17:n vuoden jälkeen, vuonna 1851, rakennettiin sahan tilalle rautatehdas. Vuonna 1936 Wärtsilä osti Onkilahden konepajan Vaasassa. Ensimmäinen dieselmoottori valmistui Turussa marraskuussa 1942, kun yritys solmi lisenssisopimuksen Friedrich Krupp Germania Werft AG:n moottoreihin vuonna 1938. /2/

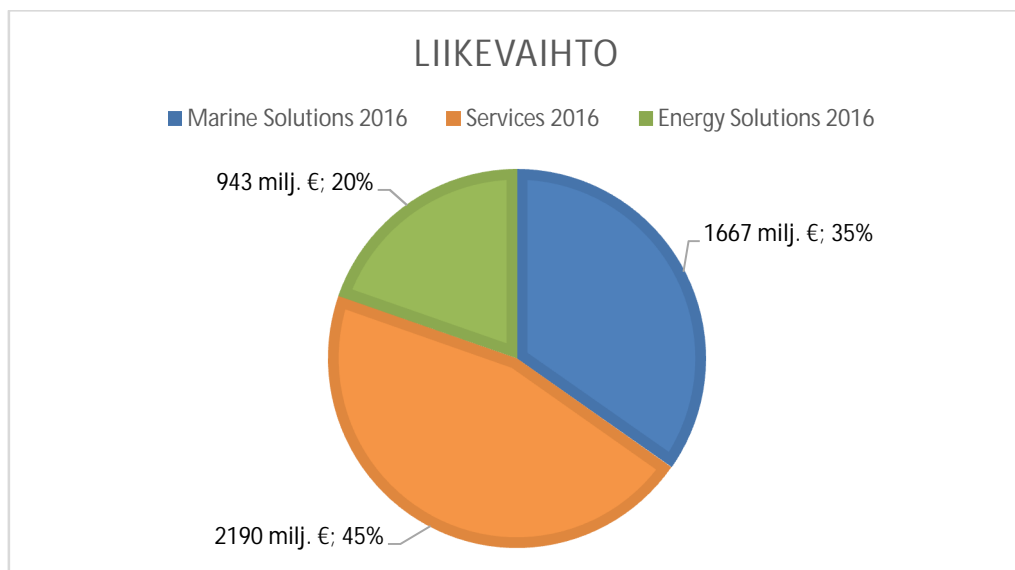
Wärtsilä on historiansa aikana tehnyt useita yrityskauppoja ja fuusioitumisia, sekä toiminut telakka-, paperikone-, lukko- ja lasiteollisuudessa. Myöhemmin Wärtsilä on myynyt osaamisensa ja keskittynyt merenkulku- ja energiamarkkinoille. /2/

2.2 Wärtsilä nykyään

Vuonna 2016 Wärtsilän henkilöstömäärä oli noin 18 000 (Kuvio 1) ja liikevaihto 4,8 miljardia euroa (Kuvio 2). Yrityksen yli 200 toimipistettä ovat yli 70 maassa eri puolilla maailmaa. Wärtsilä on jaettu kolmeen divisioonaan: Marine Solutions, Energy Solutions ja Services. Marine Solutions ja Energy Solutions tunnettiin aiemmin nimellä Ship Power ja Power Plants. /1/



Kuvio 1. Wärtsilän henkilöstömäärä vuonna 2016.



Kuvio 2. Wärtsilän liikevaihto vuonna 2016.

2.3 Marine Solutions

Marine Solutions tarjoaa meriteollisuudessa sekä öljy- ja kaasuteollisuudessa toimiville asiakkailleen turvallisia, ympäristömyönteisiä, tehokkaita, joustavia ja

taloudellisia ratkaisuja. Wärtsilä toimittaa moottoreita, aggregaatteja, alennusvaihteita, propulsiolaitteistoja, valvontajärjestelmiä sekä tiivisteratkaisuja kaikenlaisiin aluksiin ja offshore-sovelluksiin. Teknologiajohtajuuden ja kokeneen, osaavan ja omistautuneen henkilöstön ansiosta Wärtsilällä on edellytykset räätälöidä ratkaisuja, jotka tarjoavat eri puolilla maailmaa toimiville asiakkailleen optimaaliset edut. /1/

2.4 Energy Solutions

Energy Solutions keskittyy tarjoamaan erittäin joustavia polttomoottorikäyttöisiä voimalaitoksia ja suuria aurinkovoimaloita, energian varastointi- ja integrointipalveluja, sekä nesteytetyn maakaasun (LNG) terminaali- ja jakelujärjestelmiä. Voimaloita toimitetaan perusvoiman tuotantoon, öljy- ja kaasuteollisuuden tarpeisiin, kuormitushuippujen tasaamiseen sekä teollisuuden omaan energiatuotantoon. Voimalaitosten vahvuuksia ovat korkea hyötysuhde, alhaiset päästöt ja joustavat ratkaisut. Energy Solutions mahdollistaa joustavat ja tehokkaat lisäarvoa tuottavat ratkaisut, jotka mahdollistavat siirtymisen entistä kestävämpään ja nykyaikaisempaan energiajärjestelmään. /1/

2.5 Services

Services tukee asiakkaille toimitettua järjestelmää koko elinkaaren ajan optimoimalla laitteiston hyötysuhdetta ja suorituskykyä. Wärtsilä on laajentanut palvelujaan innovatiivisiin asiakkaan liiketoimintaa tukeviin palveluihin perinteisen huoltotoiminnan rinnalla. Wärtsilällä on merkkiriippumaton huolto maailman pääsatamissa sekä ennakoiva ja moottorien kuntoon perustuva huolto. Palveluverkosto, joka käsittää noin 11 000 ammattilaista 160 paikkakunnalla eri puolilla maailmaa, on toimialan laajin ja palvelee vuosittain yli 12 000 asiakasta. /1/

3 ÄÄNI

Ääni on väliaineessa etenevää kuultavissa olevaa mekaanista aaltoliikettä, eli painevärähtelyä. Ääniaalto etenee pitkittäin, kun väliaineena on kaasu, mutta kiinteissä aineissa esiintyy myös poikittaisia ääniaaltoja. Äänen nopeus ilmassa normaaliolosuhteissa merenpinnan tasolla on noin 343 m/s taajuudesta riippumatta. Yhden asteen lämpötilan nousu kasvattaa äänen nopeutta noin 0,6 m/s. /3/

Äänen nopeuden kaava /3/:

$$c = c_0 \sqrt{T/273}, \text{ jossa} \quad \begin{array}{ll} c = \text{äänen nopeus} & (1) \\ c_0 = \text{äänen nopeus } 0^\circ \text{ C} \\ T = \text{lämpötila kelvineinä.} \end{array}$$

3.1 Voimakkuus

Äänenvoimakkuuden mittayksikkö on desibeli (dB), joka on kymmenesosa belistä. Belin asteikko todettiin epäkäytännöllisen suureksi, minkä vuoksi otettiin käyttöön ihmiskuulolle paremmin soveltuva desibeliasteikko. Desibeli ei ole tietyn fyysisen suureen mittayksikkö, vaan kahden samoissa absoluuttisissa mittayksiköissä ilmaistun tason välinen logaritminen suhdeluku, minkä vuoksi desibeliarvoja ei voi suoraan laskea yhteen. Koska desibeli on dimensioton yksikkö, kutsutaan logaritmisia suureita tasoiksi. Äänen teho on verrannollinen äänenpaineen neliöön, joten äänenpaineen kasvaminen kymmenkertaiseksi vastaa äänen tehon satakertaistumista, eli 20:n desibelin nousua. Melutasossa kymmenen desibelin nousu tarkoittaa äänen energian kymmenkertaistumista. /3/

3.2 Taajuus

Äänen taajuuden yksikkö on hertsi (Hz). Taajuus kertoo ääniaaltojen värähtelyn, eli ilmanpaineen vaihtelun, lukumäärän sekunnissa. Alle 20 Hz:n taajuuksia kutsutaan infraääniksi ja yli 20 kHz:n taajuuksia ultraääniksi. /3/

Aallonpituuden kaava /3/:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \text{ jossa} \quad \lambda = \text{aallon pituus} \quad (2)$$

c = äänen nopeus

f = aallon taajuus.

Oktaavi on äänen sävelkorkeuden intervalli, joka vastaa taajuuden kaksinkertaistumista. Akustisissa mittauksissa äänenpainetaso mitataan usein oktaavikaistoilla, ja näiden taajuuksien keskitaajuudet ovat ISO:n määrittämät 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz ja 16 kHz, jotka jakavat audiospektrin kymmeneen yhtä suureen osaan. Oktaavit voidaan jakaa kolmeen, kuuteen, 12:een tai 24:ään. Kolmannesoktaavikaistaa, jota kutsutaan myös terssikaistaksi, käytetään kun oktaavi-intervalli ei ole tarpeeksi diskreetti. /4/

3.3 Ihmisen kuulo

Korva jakautuu ulko-, väli- ja sisäkorvaan. Ulkokorvaan lukeutuvat korvalehti, korvan näkyvä osa, ja korvakäytävä, jotka siirtävät ääniaallot tärykalvolle, joka taas muuntaa akustiset painevaihtelut mekaaniseksi värähtelyksi. Tärykalvo erottaa ulko- ja välikorvan. Välikorvassa sijaitsee kolme kuuloluuta: vasara, alasin ja jalustin, jotka yhdistävät tärykalvon simpukan eteisikkunaan, joka puolestaan erottaa väli- ja sisäkorvan. Sisäkorva koostuu simpukasta ja tasapainoelimestä. /3/

Ihminen aistii äänet taajuusalueelta 20–20000 Hz ja äänenpainealueelta 0–130 dB. Korvalehti ja korvakäytävä yhdessä voimistavat ja muokkaavat äänen taajuussisältöä. Korvakäytävä toimii neljännesaaltoresonaattorin tavoin vahvistaen etenkin 2–7 kHz:n ääniä noin 12–15 dB. Iän myötä ihmisen kyky kuulla ennen kaikkea heikkoja korkeataajuisia ääniä heikkenee. /3/

4 YMPÄRISTÖMELU

Ympäristömelu on haitallista tai epämiellyttävää ihmisen aiheuttamaa ulkona kuuluvaa ääntä, jonka vaikutukset ovat ihmisen terveydelle negatiivisia. Melua ympäristöön syntyy esimerkiksi tie- ja lentoliikenteestä sekä teollisuudesta. /5/

4.1 Meluindikaattorit

Ympäristömelun fysikaalista suuretta kuvataan meluindikaattoreilla, joita EU edellyttää jäsenvaltioitaan käyttämään. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2002/49/EY mukaan voidaan meluarviointi tehdä joko laskemalla tai mittaamalla arviointipisteessä. Melun häiritsevyyttä havainnollistavana mittalukuna käytetään päivä-ilta-yömelutasoa L_{den} , joka ilmaistaan desibeleinä. /5/

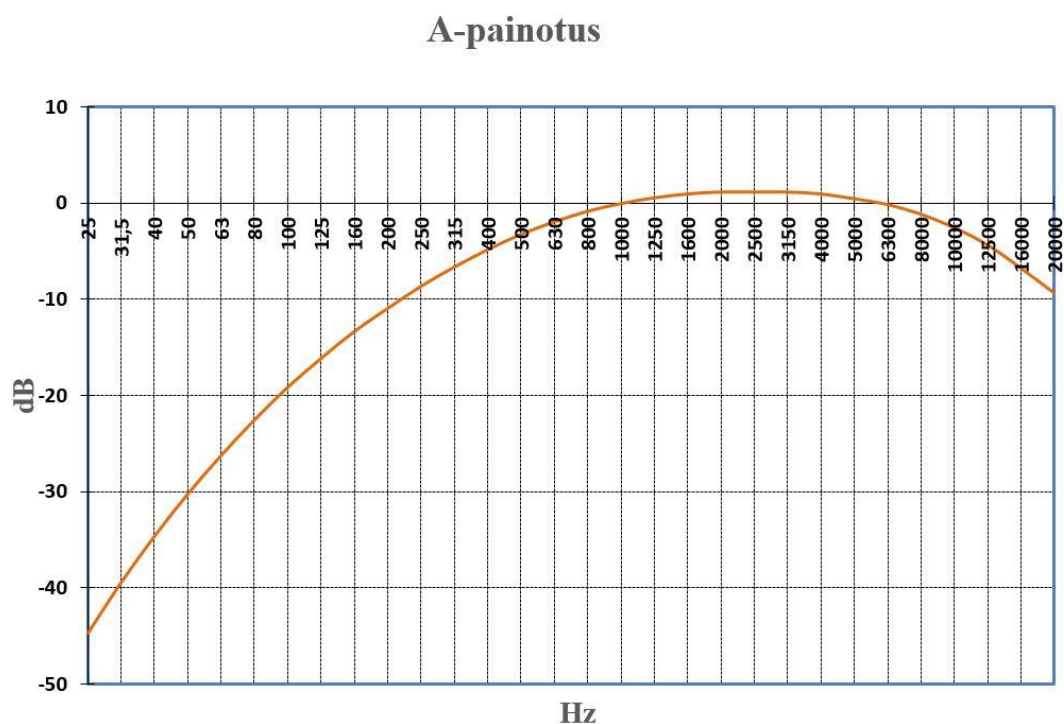
Päivä-ilta-yömelutason kaava /5/:

$$L_{den} = 10 \lg \frac{1}{24} \left(12 * 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 * 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 * 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right) \quad (3)$$

Kaavassa L_{day} , $L_{evening}$ ja L_{night} ovat standardin ISO 1996-2: 1987 mukaisia A-painotettuja pitkän aikavälin keskiäänitasoja, jotka määritellään vuoden kaikkien päivä-, ilta- ja yöaikojen mukaan. Kyseisen vuoden aikana, jolloin äänipäästöjä tarkkaillaan, tulee meteorologisten olosuhteiden vastata keskivertovuotta. Päivän pituudeksi on oletuksena asetettu 12 tuntia, illan pituudeksi neljä tuntia ja yön pituudeksi kahdeksan tuntia. Jäsenvaltiot voivat kuitenkin lyhentää iltajaksoa siirtämällä yksi tai kaksi tuntia iltajaksolta päiväjaksolle. Oletusarvot päivän, illan ja yön ajankohdille ovat kello 07.00–19.00, 19.00–23.00 ja 23.00–07.00 paikallista aikaa. Ilta-ajan (e) melua painotetaan viidellä dB:llä ja yöajan (n) melua 10 dB:llä, melun häiritsevyyden kuvaamiseksi. Painotuksella huomioidaan melun suurempi häiritsevyys tiettyinä ajankohtina. Toinen keskiäänitasoa kuvaava meluindikaattori on L_{Aeq} , joka kertoo mittausjakson aikana desibeleinä A-painotetun tehollisen keskiarvon. /4–5/

Enimmäistasoja puolestaan kuvaavat L_{max} , L_{Amax} , L_{AFmax} ja L_{AImax} , jotka ilmaisevat mittausjakson aikana korkeimman mitatun äänitason eri painotuksilla.

A-kirjain tarkoittaa A-painotusta, joka on tarkoitettu vastaamaan ihmisen kuuloaistia (Kuvio 3). A-painotus on melumittauksissa yleisimmin käytetty painotus. Kiloherzin taajuudella painotus on 0 dB, ja matalammilla taajuuksilla negatiivinen. F-kirjain tarkoittaa nopeaa aikapainotusta ja I-kirjain impulssiaikapainotusta. Muita määreitä ovat äänialtistusot L_{AE} tai SEL , jotka kuvaavat melutapahtuman äänienergian määrää normalisoituna yhteen sekuntiin. /4/



Kuvio 3. A-painotettu taajuuskäyrä.

4.2 Melun terveysvaikutukset

Häiritsevä melu lisää stressihormonin pitoisuutta ja voi toistuvana johtaa verenpaineen nousun pysyväksi. Yksi sepelvaltimotaudin riskitekijöistä on liikennemelualtistus, joka voi pahimmillaan johtaa sydäninfarktiin ja kuolemaan. Melun katsotaan aiheuttavan sepelvaltimotautia, kun L_{den} -melutaso ylittää 60 dB:n kynnyksen (Taulukko 1). /6/

Taulukko 1. Ympäristömelun vaikutukset terveyteen ja hyvinvointiin.

Vaikutus	Mittasuure	Kynnystaso
Polysomnografiassa (PSG) todettu unihäiriö	L_{\max} , sisätiloissa	32 dB
Itse raportoitu unihäiriö	L_n	42 dB
Häiritsevyys	L_{den}	42 dB
Oppiminen, muisti	L_{Aeq}	50 dB
Raportoitu terveys	L_{den}	50 dB
Kohonnut verenpaine	L_{den}	50 dB
Raportoidut heräämiset	SEL , sisätiloissa	53 dB
Sepelvaltimotauti	L_{den}	60 dB

Melun välittömät vaikutukset uneen ovat nukahtamisvaikeudet, heräämiset ja unen laadun huononeminen. Välilliset vaikutukset ovat uneliaisuuden lisäksi hyvinvoinnin, päiväaikaisen suorituskyvyn ja kognitiivisten toimintojen heikkeneminen. Euroopan ympäristökeskuksen mukaan ihmisen keho alkaa reagoida ääniin L_{Amax} -tason ylittäessä 33 dB. Heräämisen todennäköisyys kasvaa tason kasvaessa. /6/

5 DIESELMOOTTORIN PAKOMELUN VAIMENNUS

5.1 Dieselmoottorin aiheuttama pakomelu

Nelitahtisessa dieselmoottorissa tapahtuvassa polttoprosessissa melua aiheuttaa värähtelyt, mekaniikka ja itse pakokaasupulssit /7/. Pakoputkiston dynaamiset painevaihtelut aiheuttava polttoprosessi tuottaa ääniaaltoja pakoputkiston kautta ilmakehään. Pakomelun luonnetta pidetään deterministisen ja stokastisen sekoituksena. Suurin osa deterministisestä komponentista aiheutuu sylintereissä tapahtuvasta polttoaineen palamisesta, joka tuottaa voimakkaita painepulsseja sylinterin jokaisen pakotahdin aikana. Moottori tuottaa näitä pulsseja tietyn määrän suhteessa moottorin pyörintänopeuteen. Nelitahtimoottorissa polttoaine sytytetään jokaisessa sylinterissä kerran kahta moottorin kierrosta kohden. Stokastinen äänikomponentti syntyy pääasiassa turbulenttisesta pakokaasuvirtauksesta. Moottorin pakomelulla on tyypillisesti dominantteja huippuja sytytystaajuudella sekä moduloituna moottorin puolikertaluvulla. /8/

Wärtsilän suurten nelitahtimoottoreiden, 500 kW–20 MW, pakomelun sytytystaajuus on 16–85 Hz ja äänitehotaso sytytystaajuudella 130–160 dB. A-painotettuna vaimentamaton kokonaisäänitehotaso on 120–140 dB. /7/

Moottorin sytytystaajuuden kaava /8/:

$$f_{\text{firing}} = \frac{RPM \times n}{60 \text{ s} \times 2}, \text{ jossa } RPM = \text{kierrosnopeus} \quad (4)$$

n = sylinterimäärä V-moottorin yhdessä sylinteripankissa tai sylintereiden lukumäärä rivimoottorissa.

Tämä häiritsevä impulssimainen ja matalataajuinen melu laiva- ja voimalaitossovelluksissa asettaa haasteita pakomelun vaimennukselle. Äänenvaimentimia käytetään vaimentamaan ei-toivottuja ja häiritseviä taajuuksia pakomeluspektristä. Moottoreissa on oltava asianmukainen äänenvaimennin, sillä suurin osa spektrin energiasta sijoittuu alle 200:n hertsin taajuudelle. Koska A-painotettu käyrä ei kuvaa riittävästi matalataajuisia meluhäiriötä, on suositeltavaa

käyttää lineaarista pakomelukäyrää arvioitaessa mahdollisten meluvalitusten riskiä. Lähes kaikki kuultavissa oleva pakomelu koetaan häiritseväksi melun luonteesta johtuen, ja riittävän voimakas melu voi myös aiheuttaa värähtelyjä rakennuksien kevyemmissä osissa. Vaikka itse värähtelyä aiheuttava hyvin matalataajuinen ääni ei olisikaan kuultavissa, saattaa värähtely aiheuttaa esimerkiksi ikävää astioiden helinää. Melunvaimennus ei aina ole yksinkertaista, sillä vaimentimen rakenteen kompleksisuus ja fyysinen koko kasvavat suhteessa vaimennusvaatimukseen. /8–9/

Dieselmoottorin äänenvaimentimet jaetaan yleensä kahteen pääkategoriaan: resistiivisiin (absorptio) ja reaktiivisiin äänenvaimentimiin /3/. Optimaalisin vaimennuskyky saavutetaan yhdistämällä reaktiivisia ja resistiivisiä vaimenninelementtejä, jolloin vaimennetusta taajuuskaistasta saadaan laajempi /8/.

5.2 Resistiiviset äänenvaimentimet

Resistiiviset eli absorptiovaimentimet soveltuvat paremmin korkeille taajuuksille /3/. Absorptiovaimennusta käytetään pakomelun vaimennuksen lisäksi yleisesti myös moottorin imumelun vaimennuksessa, sillä ääni on hyvin korkeataajuisia.

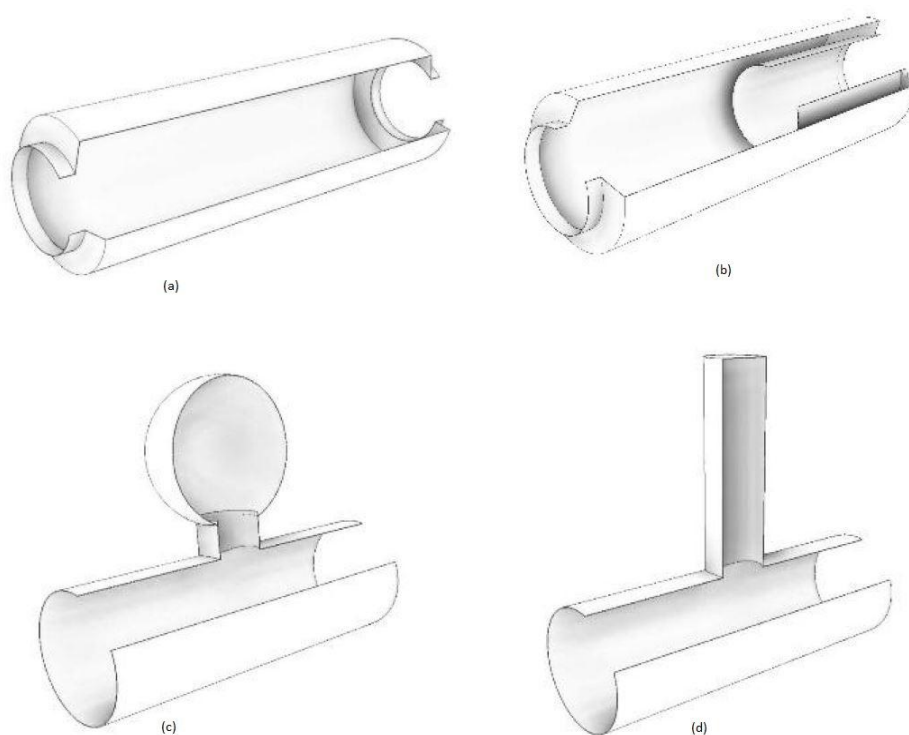
5.2.1 Absorptiovaimennin

Absorptiovaimennin perustuu painevärähtelyjen absorboitumiseen johonkin laajennuskammiossa olevaan huokoiseen materiaaliin, kuten mineraalivillaan tai lasikuituun, jolloin akustinen energia muuttuu värähtelyn kautta lämmöksi. Vaimentimen suoritusarvot riippuvat absorboivan materiaalin valinnasta ja materiaalin paksuudesta. Mitä matalataajuisempaa vaimennettava melu on, sitä paksumpi kerros absorboivaa materiaalia tarvitaan pidemmän aallonpituuden vuoksi. /3/

5.3 Reaktiiviset äänenvaimentimet

Reaktiivisten äänenvaimentimien (Kuva 1) toiminta perustuu äänen heijastumiseen. Se luo vastakkaisvaiheisen äänen, jolloin ääniaallot kumoavat toisensa. Menetelmä sopii parhaiten pitkille aallonpituuksille, eli matalille taajuuksille, sillä tällöin laskentavirheet vaikuttavat vähemmän lopputulokseen. Toinen korkeita taajuuksia

rajoittava tekijä on, että reaktiiviset vaimentimet toimivat parhaiten tasoaaltoalueella. Suurimmat eroavaisuudet reaktiivisten vaimennintyyppien välillä ovat vaimennuskyvyssä, elementin mitoissa ja painehäviössä. /3/



Kuva 1. Reaktiiviset vaimentimet: (a) laajennuskammio, (b) laajennuskammio pidennetyllä sisääntuloputkella, (c) Helmholtz-resonaattori ja (d) neljännesaaltorezonaattori. /8/

5.3.1 Neljännesaaltorezonaattori

Neljännesaaltorezonaattorissa on tietylle taajuudelle viritetty neljännesaallon pituinen aaltoputki, joka heijastaa ääntä vastakkaisessa vaiheessa kumoten alkuperäisen melun. Neljännesaaltorezonaattori vaimentaa huippukohtia viritystaajuudella ja sen parittomilla harmonisilla monikerroilla, minkä ansiosta kokonaisvaimennus laajemmalla spektrillä on parempi verrattuna Helmholtz-resonaattoriin. /3/

Dieselmoottorin pakomelun vaimennus onnistuu virittämällä useampia neljännesaaltoresonaattoreita halutuille herätetaajuuksille, ilman vastapaineen tai halkaisijan merkittävää kasvua. Wärtsilän Compact Silencer System (CSS) hyödyntää tätä pienemmän poikkipinta-alan omaavaa vaimennustekniikkaa. /8–9/

5.3.2 Laajennuskammio

Tyypillisin reaktiivinen vaimennintyyppi on laajennuskammio, joka koostuu kammio-osasta ja sisään- ja ulostulon pinta-alan epäjatkuvuuskohdasta. Laajennuskammion vaimennuskykyä voidaan lisätä jatkamalla sisään- ja ulostulon putkia kammion sisälle tai muuttamalla putken ja kammion välistä pinta-alasuhdetta. Laajennuskammiolla aikaansaadaan melko loiva mutta laajakaistainen vaimennus viritystaajuuden ja parittomien monikertojen ympäristössä. /3/

5.3.3 Helmholtz-resonaattori

Helmholtz-resonaattorin toiminta perustuu massa-jousijärjestelmään, joka eroaa toiminnallisuudeltaan jonkin verran heijastukseen perustuvista laajennuskammioista ja neljännesaaltoresonaattorista. Se koostuu suljetusta tilavuudesta, joka toimii jousena, sekä kanavasta, joka toimii massana. Tilavuus eli jousi, kommunikoi putkiston kanssa kapean kanavan kautta. Helmholtz-resonaattori mahdollistaa erittäin korkean vaimennuksen viritystaajuudella, minkä ansiosta se soveltuu asennukseen, jonka meluspektrissä on yksi voimakas vaimennettava taajuus. Dieselmoottorin tapauksessa Helmholtz-resonaattori ei ole optimaalisin vaihtoehto, sillä pakomeluspektrissä on useita voimakkaita harmonisia taajuuksia, eikä useiden Helmholtz-resonaattoreiden käyttäminen aina ole mahdollista. Erittäin matalilla taajuuksilla on Helmholtz-resonaattori käytännöllinen, sillä se ei lisää vastapainetta merkittävästi, eikä vaimenninelementti kasva kokonsa puolesta epäkäytännöllisen pitkäksi verrattuna neljännesaaltoresonaattoriin. /3/

6 ÄÄNENVAIMENTIMEN SUUNNITTELU

Äänenvaimentimen suunnittelussa on kolme vaatimusta, joiden ehdoilla vaimennin suunnitellaan: Koko, matala painehäviö sekä riittävä vaimennus. /3/

Koon, eli ulkogeometrian vaatimus edellyttää vaimentimen kokonaistilavuuden rajaamisen lisäksi myös sitä, että vaimentimen tulee olla tietyn muotoinen. Vaatimus matalasta painehäviöstä, joka on verrannollinen pakokaasun virtauksen keskinopeuden neliöön (U^2), vaikuttaa merkittävästi järjestelmän käyttökustannuksiin. Esimerkiksi henkilöauton painehäviö pakoputkistossa on suuruusluokkaa 300 mbar, ja koska vastaava tilavuusvirta on $10 \text{ m}^3/\text{min}$ on tehohäviö noin 5,5 kW. Nämä kaksi vaatimusta ovat luonnollisesti sivuehtoja viimeksi mainitulle päävaatimukselle, eli vaimennukselle. /3/

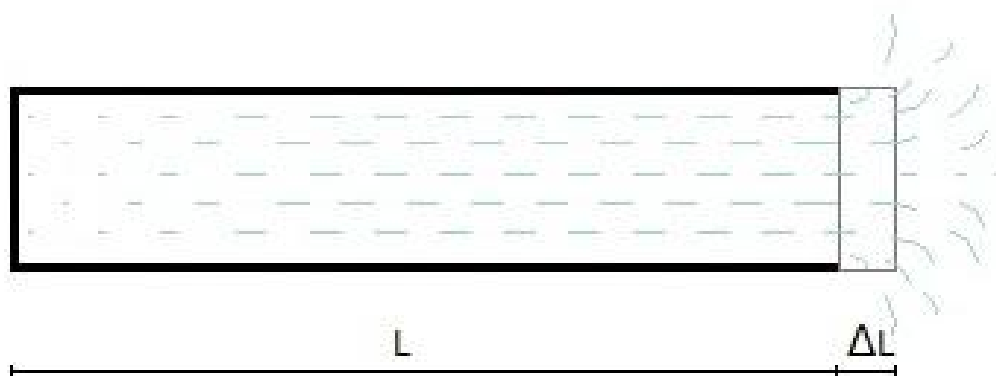
Pakomelun äänispektri on normaalissa keskinopeassa laivamoottorissa dominantti matalilla taajuuksilla. Tämän vuoksi matalien taajuuksien vaimennus on kriittistä vaimentimen suorituskyvyn kannalta. Etenkin laiva-asennuksissa on pakoputkiston käytettävissä oleva tila rajattu, mutta samaan aikaan on tarve lisätä komponenttien määrää. Näistä esimerkkeinä ovat SCR:t, pakokaasupesurit ja kattilat. Kyseisiä komponentteja voidaan myös pitää vaimentimina sillä edellytyksellä, että niiden vaimennusominaisuudet ovat tiedossa. Tämä luo uusia mahdollisuuksia vaimentimen suorituskyvyn optimointiin todellisten vaimennusvaatimusten mukaan. Pakojärjestelmän monimutkaisuutta rajoittaa kuitenkin vastapaine, sillä jokaisella moottorityypillä on suurin sallittu vastapaineraja, jota ei voida ylittää. /8–9/

Akustisen aallon eteneminen kanavassa riippuu kanavan halkaisijasta ja aallonpituudesta. Alimman moodin taajuuden f_{01} alapuolella ovat aallonpituudet liian pitkiä kulkeakseen kanavassa poikittain. Äänen edetessä tasoaaltona, esiintyy ainoastaan pituussuuntaisia aaltoja. Tämä tarkoittaa, että missä tahansa kanavan pisteessä, on äänenpaine vakio koko poikkipinta-alalla. Tätä aluetta kutsutaan tasoaaltoalueeksi, ja se on erittäin oleellinen käsite, kun tarkastellaan äänen etenemistä kanavassa. Korkeammilla taajuuksilla on aallon eteneminen monimutkaisempaa, kun poikittaisia aaltoja alkaa esiintyä, sillä äänenpaine

vaihtelee myös putken poikkipinta-alalla. Tästä syystä tasoaaltoalueella käytetään reaktiivisia elementtejä, ja tasoaaltoalueen yläpuolella yleensä resistiivisiä elementtejä. /8–9/

6.1 Päätykorjaus

Neljännesaaltoresonaattorin resonanssi syntyy, kun resonaattorin pituus on puolet tai neljäsosa ääniaallon pituudesta. On kuitenkin havaittu, että käytännössä taajuus ilmenee matalampana, minkä vuoksi joudutaan huomioimaan akustinen pituus, eli lisäämään päätykorjaus. Onnistunut päätykorjaus on äänenvaimentimen suunnittelussa avainasemassa, sillä pakomelun melupiikit ovat hyvin kapeita, jolloin aaltoputken suunniteltu viritystaajuus tulee olla sama kuin mitattu ja toteutunut viritystaajuus. Resonaattorin putki vaikuttaa akustisesti jonkin verran pidemmältä kuin sen fyysinen pituus, sillä ilman akustinen värähtely jatkuu myös putken pään välittömässä läheisyydessä. Tätä pituuden lisäystä, ΔL , kutsutaan päätykorjaukseksi (engl. end correction). Resonanssitaajuuden laskennassa tulisi käyttää fyysisen pituuden ja päätykorjauksen summaa (Kuva 2), jotta viritystaajuuden saavuttamisessa onnistuttaisiin. /3/



Kuva 2. Päätykorjaus. /3/

Pyöreän putken päätykorjauksessa käytettävä likimääräinen kaava riippuu putken olosuhteista /3/:

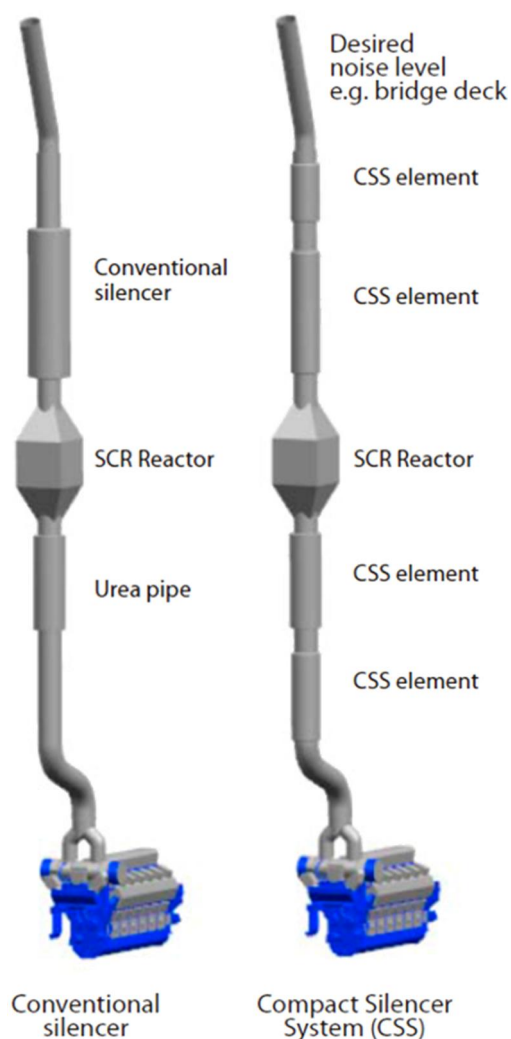
$$\Delta L = \frac{0,82 D}{2}, \text{ putken pää kanavassa.} \quad (5)$$

$$\Delta L = \frac{0,61 D}{2}, \text{ avoin putken pää.} \quad (6)$$

Päätykorjauksen yhteydessä käytetään kahta eri termiä päätykorjauksen lisäksi. Kun puhutaan akustisesta pituudesta (engl. acoustic length), tarkoitetaan käytännössä mitta $L + \Delta L$. Roikkuvasta massasta (engl. hanging mass) puhuttaessa tarkoitetaan ΔL :n massaa.

6.2 Compact Silencer System

CSS on alun perin kehitetty ABB Fläkt Marinen toimesta kaasuturbiinimoottoreiden melunvaimennukseen, mutta myöhemmin sovellettu dieselmoottorikäyttöön. Nykyään Wärtsilä omistaa kaikki CSS-patentit. CSS kehitettiin aikaansaamaan joustava ja suorituskykyinen melunvaimennus erittäin vaativille sovelluksille, kuten risteilyalukset erittäin matalilla pakokaasupäästövaatimuksilla. Konsepti perustuu moduulirakenteeseen, joka mahdollistaa monipuolisen vaimennintoteutuksen annetuilla muotorajoitteilla. CSS:n suorituskyky perustuu usean vaimenninelementin sarjaan pakoputkistossa (Kuva 3). CSS-elementeillä on alhaisempi painehäviö verrattuna perinteisiin äänenvaimentimiin, jolloin päästöjä vähentäviä komponentteja, kuten SCR-järjestelmää, voidaan käyttää vapaammin vastapainerajaa ylittämättä. Järjestelmän monimutkaistuessa liikaa on vastapaineraja silti mahdollista ylittää. /8–9/

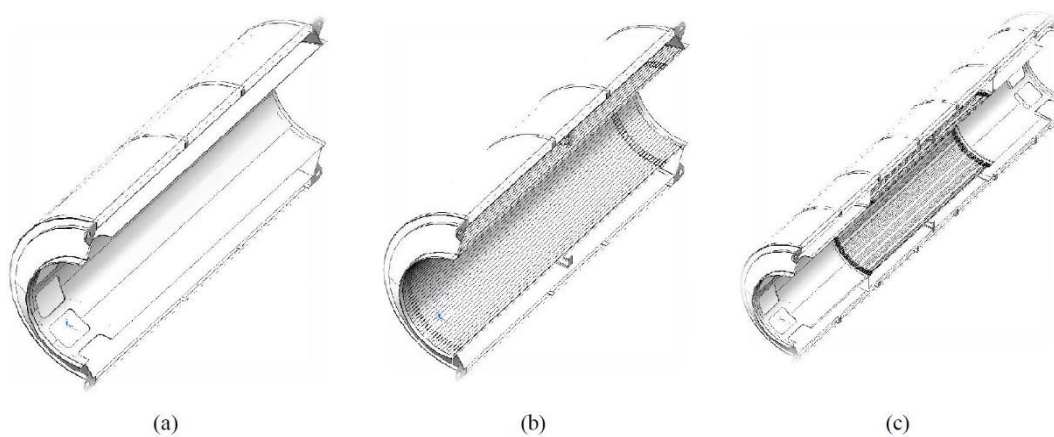


Kuva 3. Laivamoottorin vaimennintoteutuksia. Vasemmalla tavallinen ja oikealla CSS. /8/

Dual Fuel -moottorit (DF) tuovat haasteita pakokaasun lämpötilamuutosten vuoksi. Pakokaasun lämpötila (EGT) voi vaihdella 10 % riippuen moottorissa käytetystä polttoaineesta. Pakokaasun lämpötilan vaihtelu voi johtaa neljännesaaltoresonaattorin virityksen muuttumiseen, koska äänen nopeus muuttuu lämpötilan muuttuessa. Virityksen muuttuminen voi johtaa merkittävään vaimennuksen heikkenemiseen halutulla taajuudella. /8–9/

Vaimentimen suunnittelu on jaettu usealle elementille, joissa jokainen elementti on valittu tietylle taajuudelle. CSS-tyyppisiä neljännesaaltoresonaattoreita käytetään

matalilla taajuusalueilla, yleensä vaimentamaan moottorin sytytystaajuutta tai yksittäisiä kertalukuja. Neljännesaaltoresonaattorin suorituskyky maksimoidaan kapealle kaistalle viritystaajuuden alueelle sekä pienemmillä vaimennushuipuilla viritystaajuuden parittomille kertaluvuille. Kolmoiselementti on erityisempi CSS-vaimennin, jossa kaksi reaktiivista elementtiä ovat yhdessä resistiivisen elementin kanssa (Kuva 4). /8–9/



Kuva 4. CSS-järjestelmissä käytettyjä tyypillisiä vaimenninelementtejä. (a) Reaktiivinen neljännesaaltoresonaattori, (b) resistiivinen elementti korkeiden taajuuksien vaimennukseen, ja (c) kolmoiselementti. /9/

CSS-vaimentimen suunnittelussa käytetään omaa CSS-koodia, joka on itsessään hyvin laaja ja kompleksinen. CSS-koodin päälle on kuitenkin kehitetty MATLAB-laskentaohjelmistossa varsin toimiva käyttöliittymä, jolla äänenvaimentimen laskenta ja suunnittelu toteutetaan.

7 VAIMENTIMEN SUORITUSKYVYN ARVIOINTI

Vaimentimen suorituskyvyn arviointi voidaan suorittaa tehtaalla ennen tuotteen toimitusta asiakkaalle, tai vaihtoehtoisesti mittaamalla pakomelun vaimennus asiakkaan tiloissa käyttöönoton yhteydessä. Tämän lisäksi mittaukset voidaan suorittaa eri tavoin, kuten putken sisältä (engl. in-duct) tai putken pään ulkopuolelta.

7.1 Cold verification

Kylmäverifiointi on toimittajan tai valmistajan tiloissa suoritettava testaus, joka osoittaa täyttääkö vaimennin sille asetetut vaatimukset. Tehdastestissä ei yleensä käytetä installaatiota vastaavaa moottoria, vaan melu joudutaan simuloimaan käyttämällä esimerkiksi valkoista kohinaa (engl. white noise). Valkoinen kohina on spektraaliselta jakaumaltaan tasainen ja sisältää kaikkia taajuuksia. Vaimennusmittaus valkoisella kohinalla ei kuitenkaan ole täysin luotettava, eikä vastaa oikealla moottorilla tapahtuvaa mittausta, vaikka laskennassa huomioidaankin matalamman lämpötilan aiheuttama äänen nopeuden muutos. Äänen nopeus pakokaasun 350 °C lämpötilassa on 500 m/s ja huoneenlämmössä 343 m/s.

7.2 Hot verification

Kuumaverifiointi suoritetaan installaatioissa, tässä tapauksessa laivalla asiakkaan tiloissa. Mittaus tehdään normaalissa toimintaympäristössä moottorin tuottamalla kuumalla pakokaasulla. Moottorin toimiessa melulähteenä saadaan hyvin luotettava kuva vaimentimen toiminnasta. Kuumaverifioinnin tuloksia käytetään myös lopullisessa meluraportissa.

7.3 Vaimentimen suorituskykyä kuvaavat suureet

Pakoputkiston sisältä voidaan mitata vaimentimen vaimennuskyky kolmella eri suureella, jotka ovat paremmuusjärjestyksessä parhaimmasta huonoimpaan: Insertion Loss (IL), Transmission Loss (TL) ja Noise Reduction (NR). Uuden vaimentimen vaimennustasoa tutkittaessa ennen vaimentimen toimitusta

asiakkaalle, voidaan käyttää kaiuttimella tuotettua melua. Tämä melu on yleensä niin sanottua valkoista kohinaa, joka suunnataan putkeen. Ennen varsinaisen vaimennuksen mittausta tulee mitata taustamelu, jolloin voidaan arvioida mittauksen luotettavuus. Mikäli mittaus suoritetaan installaatiossa, käytetään melulähteenä luonnollisesti moottoria, jonka pakoputkistoon vaimennin on suunniteltu ja asennettu.

7.3.1 Insertion Loss

Insertion Loss (vapaasti suomennettuna lisäysvaimennus) mitataan menetelmällä, jossa melu mitataan kahdesti yhdellä mikrofonilla. Ensin mittaus suoritetaan pelkällä putkella, minkä jälkeen putki korvataan vaimentimella ja mitataan uudelleen, jolloin saadaan suoraan selville vaimentimen aiheuttama muutos. IL mittaa eroa äänenpaineessa ennen ja jälkeen vaimentimen asennuksen.

7.3.2 Transmission Loss

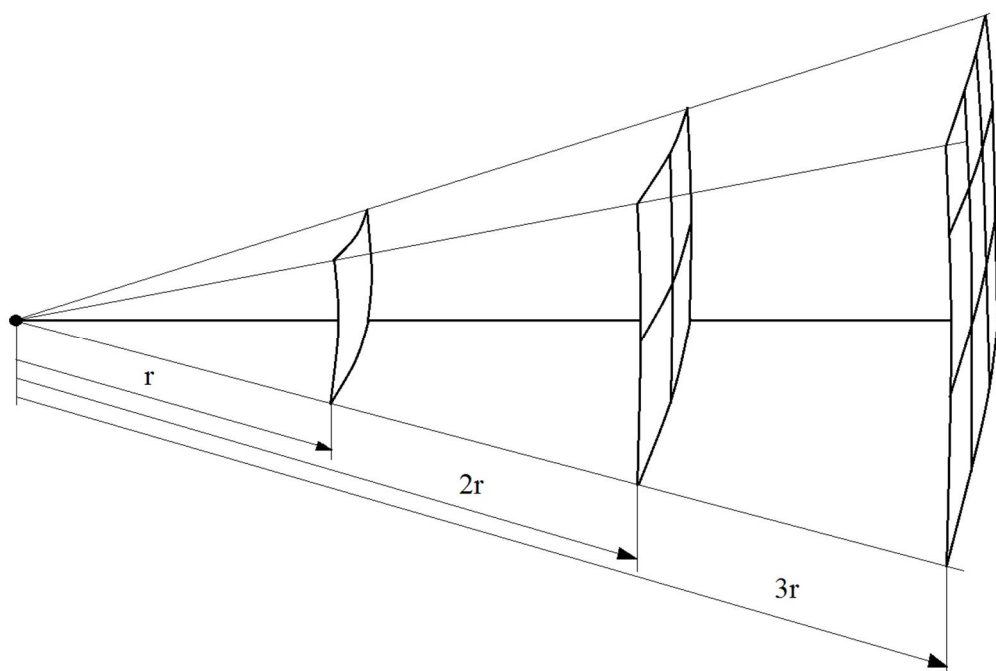
Transmission Loss (vapaasti suomennettuna siirtohäviö) mitataan menetelmällä, jossa esimerkiksi kolme mikrofonia sijoitetaan määrätyn välein ennen vaimenninta ja kolme mikrofonia samalla tavalla vaimentimen jälkeen. Useammalla mikrofonilla saadaan huomioitua heijastukset mittaamalla äänen suunta ja poistamalla väärään suuntaan kulkeva ääni tuloksista. Laskemalla pois heijastukset, on putki teoriassa äärettömän pitkä. Kyseisellä menetelmällä voidaan laskea mittaustuloksista erotus, josta saadaan luotua kuvaaja äänitehon eroista. Tämä menetelmä on yleisimpiä putken sisällä tapahtuvista vaimennusmittauksista.

7.3.3 Noise Reduction

Noise Reduction (vapaasti suomennettuna melun vähennys) mitataan menetelmällä, jossa mikrofoni sijoitetaan ennen ja jälkeen vaimentimen, jolloin näiden erotus on melun vähennys. Tällä menetelmällä mitataan äänenpaine-eroa, eikä se huomioi heijastuksia. NR on helpoin ja yksinkertaisin mittausmenetelmä.

7.4 Mittaus putken pään ulkopuolelta

Laivoissa ääni mitataan usein pakoputken ulkopuolelta. Mittaamalla äänenpaine tietyltä etäisyydeltä putken päästä, voidaan myös tarvittaessa laskea äänitehotaso L_W . Äänitaso laskee kuusi desibeliä jokaista etäisyyden kaksinkertaistumista kohden, toisin sanoen, ääniteho jakautuu suuremmalle pinta-alalle, jolloin intensiteetti vähenee neljäsosaan etäisyyden kaksinkertaistuessa (Kuva 5). Jos halutaan varmistaa, ettei muut äänilähteet vaikuta mittaukseen, voidaan tehdä useampi mittaus eri etäisyyksiltä. Mittaamalla äänenpaine myös kahden ja neljän metrin etäisyydeltä, pitäisi mittaustuloksissa näkyä kuuden desibelin erot. Mikäli äänitaso kasvaa eikä noudata kuuden desibelin vähennystä, vaikuttaa mittaukseen todennäköisesti jokin muu äänilähde tai heijastus. Mikäli äänitaso on metrin etäisyydellä 100 dB, tulisi sen olla kahden metrin etäisyydellä 94 dB ja neljän metrin etäisyydellä 88 dB. /3, 10/



Kuva 5. Äänen intensiteetti vähenee yhdeksäsosaan, kun etäisyys kolminkertaistuu. /3/

Äänitehotason ja äänenpainetason välinen kaava /3/:

$$L_p = L_W + 10 \log \left(\frac{1}{Q\pi r^2} \right), \text{ jossa} \quad L_p = \text{äänenpainetaso} \quad (7)$$

$L_W = \text{äänitehotaso}$
 $r = \text{etäisyys äänilähteestä}$
 $Q = \text{äänien leviämistapa.}$

Q-arvon avulla voidaan huomioida äänen heijastuminen. Q = 4 tarkoittaa äänen pallomaista leviämistä joka suuntaan, jolloin äänilähde sijaitsee esimerkiksi korkean savupiipun päässä. Q = 2 tarkoittaa puolipallomaista leviämistä, jolloin ääni pääsee leviämään lähteestä vain 180 asteen alalle, esimerkiksi jos äänilähde on maassa tai katolla. Q = 1 tarkoittaa äänen leviämistä neljännespallomaisesti, kun äänilähde sijaitsee esimerkiksi nurkassa, jolloin lattia ja kaksi seinää estävät äänen leviämistä muihin suuntiin. /3, 10/

Melumittauksissa huomioidaan myös alle 20 Hz:n taajuudet rakenteiden mahdollisten värähtelyiden vuoksi, mutta yleisesti käytetty A-painotus painottaa korkeampia taajuuksia, jolloin kaikista matalimmat taajuudet heikkenevät.

8 TROOLARI

8.1 Taustatietoa

Alus, johon työn aiheena oleva äänenvaimennin asennettiin, on norjalainen vuonna 2014 valmistunut kalastusalus (Kuva 6). Alus on 67 metriä pitkä ja 14,8 metriä leveä. Aluksen päämoottorina (ME) on 4000 kW tuottava Wärtsilä W8L32, kahdeksansylinterinen rivimoottori, jonka polttoaineena on meridieselöljy (MDO). Moottorin kierrosnopeus on 750 RPM, jolloin kierrosnopeus sekunnissa on 12,5, ja sytytystaajuus 50 Hz. Apumoottoreina toimivat kaksi Caterpillarin C32 dieselgeneraattoria, joiden kierrosnopeus on 1800 RPM.



Kuva 6. Troolari. /11/

Asiakas on aluksen toimituksesta asti saanut valituksia äänekkäästä pakomelutasosta, minkä lisäksi laivan miehistö on kokenut melun epämiellyttäväksi. Melun voimakkuutta havainnollistaa se, että laivan saapumisen kuuli jo ennen kuin se näkyi.

Aluksessa on ennestään yksi äänenvaimennin, joka ei ole Wärtsilän, vaan telakan toimittama. Wärtsilältä tilattiin alkuperäisen äänenvaimentimen rinnalle toinen äänenvaimennin meluongelman korjaamiseksi. Vanha äänenvaimennin sijaitsee lähempänä moottoria, ja uusi CSS-vaimennin asennettiin lähelle pakoputkiston loppupäätä.

Tämän työn tarkoituksena on tarkastella uuden äänenvaimentimen toimivuutta ja suunnittelussa käytettyjä arvoja, sekä verrata todellista vaimennusta suunniteltuun ja simuloituun vaimennukseen.

8.2 Mittauslaitteet

8.2.1 Laivalla käytetyt mittauslaitteet

Aluksella suoritetuissa lähtötason ja lopullisen melutason 1/3-oktaavikaistamittauksissa käytettiin RION NA-28 -äänitasomittaria, jossa on oma mikrofoni (Kuva 7). Mittauspisteet 3–8 mitattiin myös kapeakaistoina Benstone Impaq -FFT-äänianalysaattorilla, jossa käytettiin GRAS 40AE -mikrofonia. Äänitasomittarit kalibroitiin ennen ja jälkeen mittauksien Brüel & Kjær 4231 -äänikalibraattorilla (Kuva 8). Ulkomittauksia varten kytkettiin äänitasomittarin mikrofoniiliitäntään jatkojohto, joka kiedottiin mikrofoniin pitkin mikrofoniiin. Mikrofonin päässä käytettiin vaahtomuovista valmistettua tuulisuojaa.



Kuva 7. RION NA-28. /12/



Kuva 8. Brüel & Kjær 4231. /13/

8.2.2 Tehtaalla käytetyt mittauslaitteet

JTK Power Oy:n tuotantotiloissa tehdyssä mittauksessa käytettiin JTK:n BSWA MA231 -mikrofoneja, sekä RION NC-74 -äänikalibraattoria. JTK Power mittasi LABview-ohjelmistolla ja Wärtsilä Benstone Impaq –FFT-äänianalysaattorilla.

8.3 Alkuperäisen melutason mittaus yhdellä äänenvaimentimella

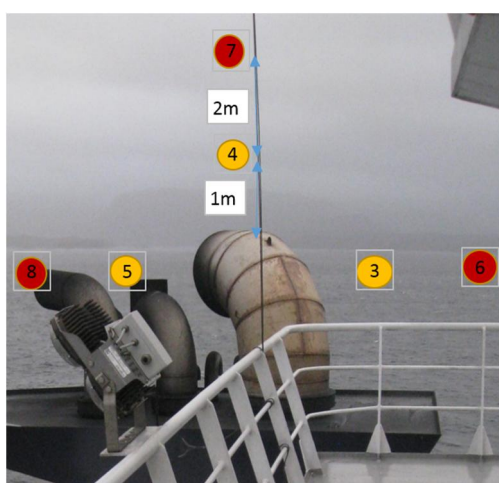
Aluksella suoritettiin Wärtsilän toimesta pakomelumittaus 7.12.–8.12.2016 pelkästään vanha äänenvaimennin asennettuna. Pakomelumittauksen tarkoituksena oli kartoittaa lähtötilanne ja antaa vaimentimen suunnittelulle tarpeelliset arvot. Pakomelua mitattiin lyhyellä merimatalla, pääasiassa korkealta läheltä pakoputken päätä, joka sijaitsee aluksen katolla (Kuva 9). Kuorma merimatalla mittauksen aikana oli noin 70 % kierrosnopeudella 734 RPM. Apumoottorit olivat käynnissä mittauksien aikana.



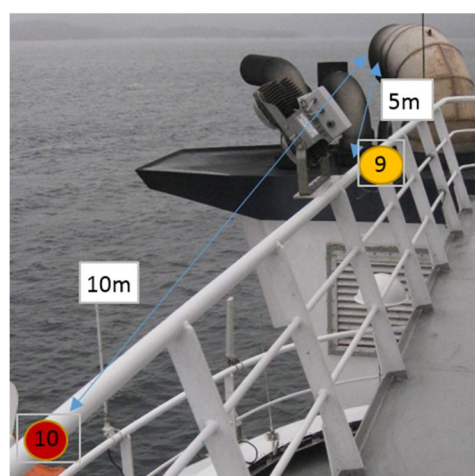
Kuva 9. Pakoputken pään sijainti.

8.3.1 Mittaustulokset

Mittaukset suoritettiin useasta eri pisteestä ympäri laivan. Pisteet 3, 4 ja 5 mitattiin yhden metrin etäisyydellä pakoputken päästä, ja pisteet 6, 7 ja 8 mitattiin kahden metrin etäisyydellä pakoputken päästä (Kuva 10). Mittaukset suoritettiin varmuuden vuoksi myös pisteistä 9 ja 10 (Kuva 11), viiden ja kymmenen metrin etäisyyksiltä pakoputken päästä, mittaustulosten luotettavuuden varmistamiseksi.

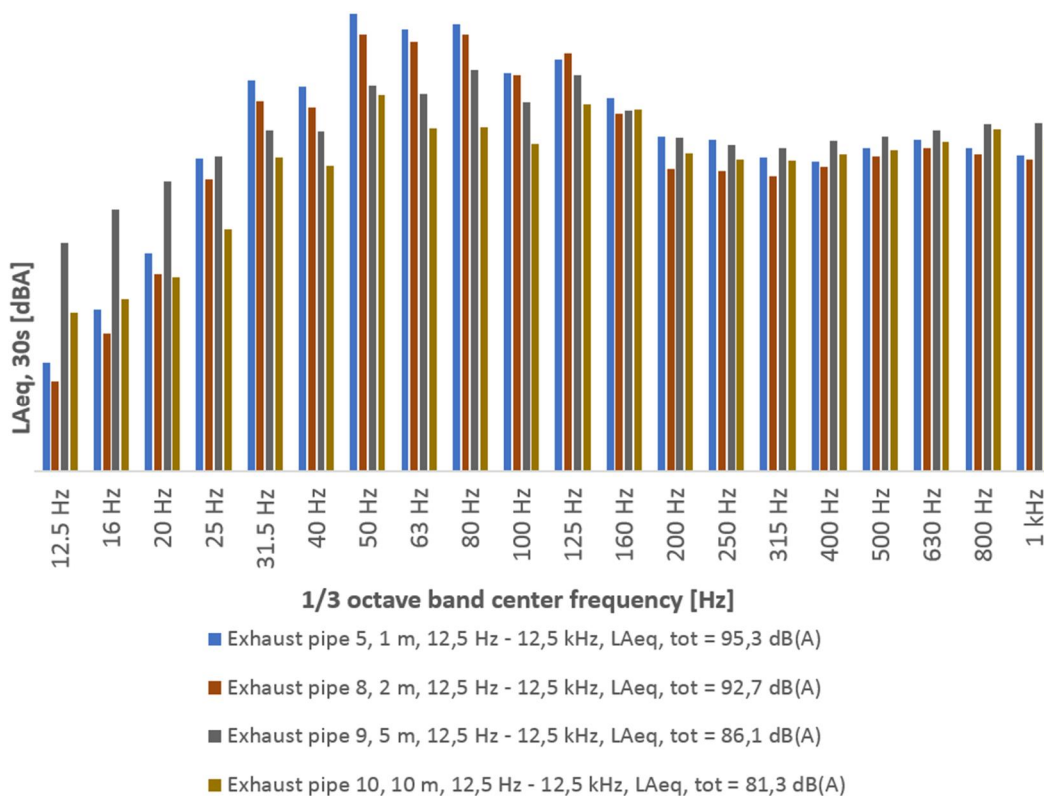


Kuva 10. Mittauspisteet 5 ja 8.



Kuva 11. Mittauspisteet 9 ja 10.

Pisteistä 5, 8, 9 ja 10 mitattujen 30 sekunnin A-painotettujen terssikaista-analyysien merkittävimmät pakomelupiikit sijoittuivat 31,5:een, 50:een, 63:een ja 80:een hertsiin (Kuvio 4). Mittauspisteiden 5 ja 8 välillä pitäisi pakomelutaajuuksilla teoriassa näkyä kuuden desibelin erot, kuten myös pisteiden 9 ja 10 välillä, mutta todellisia arvoja ei y-akselilla voida näyttää salassapitosyistä. Pakomelutaso näyttää kuitenkin pylväskaavion mukaan putoavan realistisesti etäisyyden kasvaessa. Matalataajuinen pakomelu erottuu selvästi esimerkiksi kilohertsin taustamelusta. Moottorin 50 hertsin sytytystaajuus erottuu vahvimmin.



Kuvio 4. A-painotettu 30 sekunnin 1/3-oktaavianalyysi yhdellä vaimentimella mittauspisteistä 5, 8, 9 ja 10.

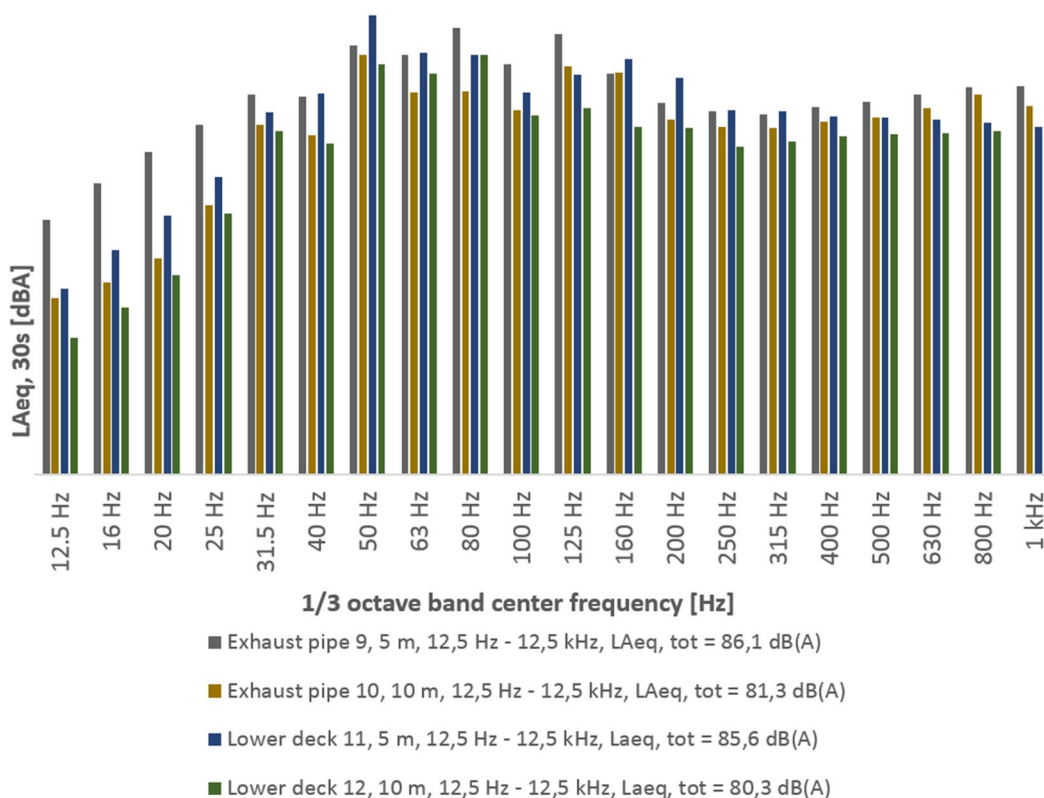
Kuviossa 4 ovat mittauspisteen 9 matalat taajuudet, 12,5, 16 ja 20 Hz, huomattavasti voimakkaammat kuin yhden ja kahden metrin etäisyydeltä mitatut saman taajuuden äänet. Tämä selittyy osittain pisteen 9 vieressä olevan suuren seinän aiheuttamista heijastuksista tai seisovista aalloista, mutta sitä ei pystytä varmistamaan. Äänitallennetta kuunnellessa ei merkittävästi voimakkaampaa pakomelua kuitenkaan kuulu, sillä alle 20 hertsin ääniä ei ihminen kuule. Tallenteella kuulee kuitenkin matalaa tuulen tai aaltojen iskujen aiheuttamaa melua. Tuuli on myös voinut aiheuttaa pientä poikkeamaa tuloksiin, sillä sää on mittaushetkellä ollut tuulinen.

Viiden ja kymmenen metrin mittaukset tehtiin myös toiseen suuntaan hieman alaviistoon, kohti aluksen keulaa. Mittauspiste 11 on viiden metrin etäisyydellä pakoputken päästä, ja mittauspiste 12 kymmenen metrin etäisyydellä alemmalla kannella (Kuva 12).



Kuva 12. Mittauspisteet 11 ja 12.

Kun tarkastellaan pisteistä 9, 10, 11 ja 12 mitattujen 30 sekunnin terssikaista-analyysien tuloksia (Kuvio 5), nähdään viiden metrin etäisyyden mittauksissa huomattava ero.



Kuvio 5. A-painotettu 30 sekunnin 1/3-oktaavianalyysi yhdellä vaimentimella mittauspisteistä 9, 10, 11 ja 12.

Mittaukset on tehty aluksen ollessa liikkeellä, jolloin äänen tarvitsee vastatuulen vuoksi kulkea pidempi matka ilmassa pisteeseen 11 kuin pisteeseen 9. Tämän voi rinnastaa siihen, että mittaus tapahtuisi pidemmältä etäisyydeltä. Lämpötilan ollessa 5 °C, on äänen nopeus merenpinnan tasolla noin 334 metriä sekunnissa.

Mikäli tuulen nopeus on 20 m/s, ja etäisyys äänilähteeseen viisi metriä, voidaan laskea tuulen vaikutus äänen kulkemaan näennäiseen etäisyyteen:

$$t = \frac{s}{v}, \text{ matka-ajan kaava.} \quad (8)$$

$$\frac{5 \text{ m}}{334 \text{ m/s}} = 0,0149700 \text{ s, aika jossa ääni kulkee viisi metriä.}$$

$\frac{5 \text{ m}}{314 \text{ m/s}} = 0,0159235 \text{ s}$, aika jossa ääni kulkee viisi metriä 20 m/s vastatuulella.

$$s = t * v, \text{ matkan kaava.} \quad (9)$$

$$0,0159235 \text{ s} * 334 \text{ m/s} = 5,32 \text{ m}, \text{ äänen näennäisesti kulkema matka.}$$

Tuloksesta voi todeta, että vastatuulen pidentämä matka pisteiden 9 ja 11 välillä, on hyvin pieni viiden metrin etäisyydellä, ainoastaan 0,32 m. Äänen absorboituminen tällä etäisyydellä on hyvin vähäistä. On todennäköisempää, että heijastukset ja hetkellinen kovempi tuulenpuuska ovat vääristäneet pisteen 9 mittauksen tuloksen, vaikka mikrofoni onkin ollut tuulisuoja päällä. Pisteet 11 ja 12 mitattiin myös alempaa, jolloin tuuli ei ole päässyt vaikuttamaan mittaukseen yhtä voimakkaasti.

Doppler-ilmiön voi tuulisella säällä myös aiheuttaa vähäistä vääristymää taajuuteen. Doppler-ilmiö on äänen taajuudessa havaittava muutos, joka johtuu havaitsijan ja äänilähteen liikkeestä toisiinsa nähden. Mikäli äänen taajuus muuttuisi äänilähteen ja mittauspisteen välillä, siirtyisi äänienergia alkuperäiseltä taajuudeltaan ja aiheuttaisi muutoksen 1/3-oktaavikaistojen vaimennustuloksissa. Tuulen nopeuden sekä mittauslaitteen ja äänilähteen etäisyyden pysyessä vakiona, ei Doppler-ilmiötä kuitenkaan synny. Seuraavassa esimerkissä äänilähde on havaitsijasta alatuulen puolella. Äänilähde säteilee 25 hertsin ääntä vastatuulen ollessa vakaa 20 m/s:

$$f_0 * \left(\frac{v - v_w}{v - v_w} \right) = f, \text{ jossa} \quad f_0 = \text{alkuperäinen taajuus} \quad (10)$$

v = äänen nopeus

v_w = tuulen nopeus

f = taajuus.

$$25 \text{ Hz} * \left(\frac{334 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{334 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \right) = 25 \text{ Hz}$$

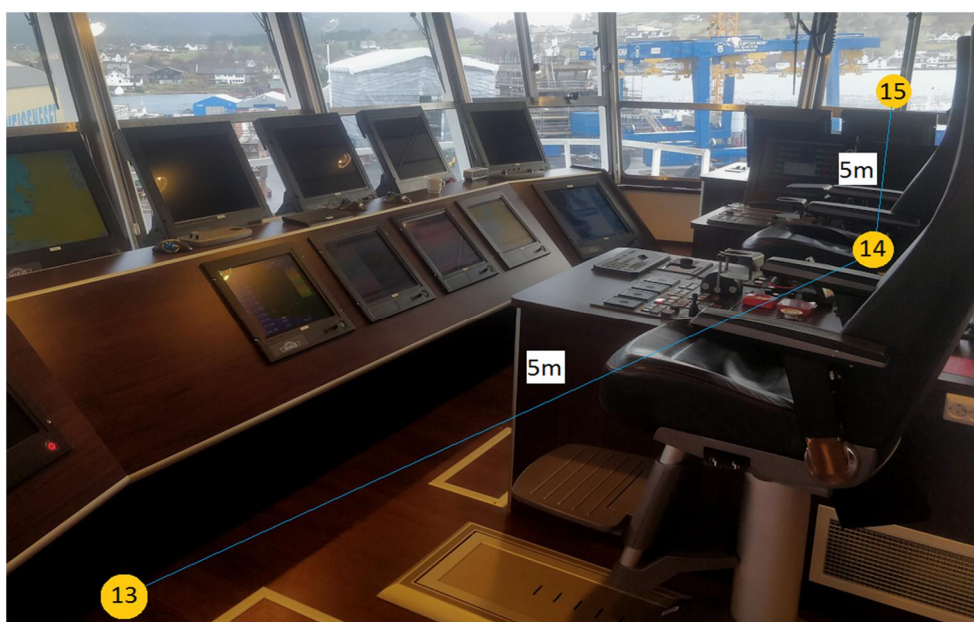
Tuulen nopeuden vaihtelu mittauksen aikana voi sen sijaan aiheuttaa taajuuden muutoksen, vaikka havainnointipiste ja äänilähde pysyisivätkin toisiinsa nähden

paikallaan. Tuulen nopeuden vaihtelun merkitys on kuitenkin hyvin pieni. Seuraavassa esimerkissä äänilähde on jälleen havaitsijasta alatuulen puolella. Äänilähde säteilee 25 hertsin ääntä, ja vastatuulen nopeus kasvaa 10:stä 20 m/s:iin:

$$25 \text{ Hz} * \left(\frac{334 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{334 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \right) = 24,22 \text{ Hz}$$

Tuulen nopeuden muutos kyseisillä arvoilla voisi teoriassa muuttaa taajuutta 0,78 Hz, mutta tuulen nopeuden vaihtelut ovat jatkuvia ja suhteellisen pieniä, eivätkä siksi vaikuta suuresti 30 sekunnin keskiarvomittaukseen. On kuitenkin hyvä todeta, että mitä suurempi taajuus, sitä enemmän Doppler-ilmiö vaikuttaa suuremman kertoimen (taajuus) vuoksi.

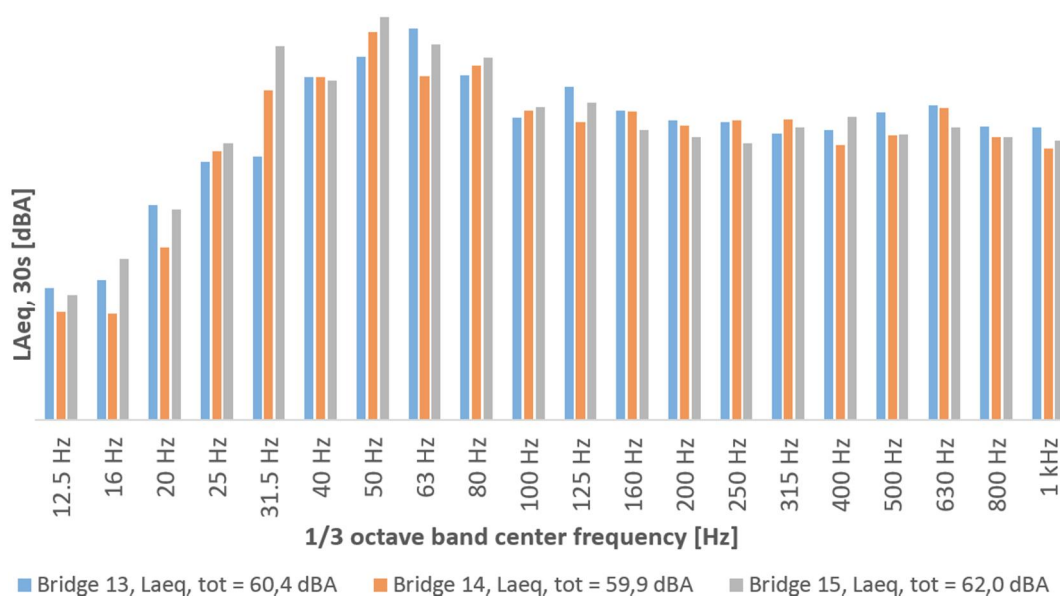
Mittauspisteet 13, 14 ja 15 sijaitsevat komentosillalla viiden metrin välein, kulkusuuntaan nähden vasemmalta oikealle (Kuva 13).



Kuva 13. Mittauspisteet 13, 14 ja 15 komentosillalla.

Kuvio 6 kertoo äänenpainetason komentosillalla mittauspisteissä 13, 14 ja 15. Pisteessä 15 on 31,5:n hertsin terssikaistalla havaittavissa selvä kasvu äänitasossa

verrattuna pisteisiin 13 ja 14. Korkeampi arvo pisteessä 15 johtuu todennäköisesti seisovista aalloista, jolloin aalto vahvistaa, eli interferoi, itseään kimmotessaan seinästä. Myös huonemoodiksi kutsuttu ilmiö syntyy, kun huone on puolet ääniaallon pituudesta tai sen monikerta. 31,5:n hertsin aallonpituus on noin 11 m, eli saman pituinen kuin komentosillan leveys, joka on myös noin 11 – 13 m.



Kuvio 6. A-painotettu 30 sekunnin 1/3-oktaavianalyysi yhdellä vaimentimella mittauspisteistä 13, 14 ja 15.

8.4 Uusi CSS-äänenvaimennin

Uusi äänenvaimennin suunniteltiin Wärtsilässä ja valmistettiin Vöyrillä JTK Power Oy:ssä. Vaimennin on suunniteltu aluksen mittarajoitteiden ehdoilla mahdollisimman suureksi, sillä isommalla vaimentimella on helpompi saavuttaa parempi vaimennustaso. Vaimentimen laskennallinen suunnittelu tehtiin käyttämällä CSS-koodia, jossa akustinen pituus laskettiin resonaattorin pohjan ja aukon keskikohdan välisestä mitasta. Mallinnus tehtiin Siemens NX –3D-suunnitteluohjelmistolla, verkotus SIMULIA Abaqus -ohjelmistolla ja FEM-laskenta VA One -ohjelmistolla. Vaimentimessa on kolme

neljännesaaltoresonaattoria viritettyinä eri taajuuksille. Ensimmäinen neljännesaaltoresonaattori viritettiin 30,6:een hertsiin, toinen 49:ään hertsiin, ja kolmas 79:een hertsiin. FE-analyysissä vaimennushuiput osuivat 32,5:een, 54,3:een ja 91,5:een hertsiin.

Seuraavia arvoja käytettiin FEM-laskennassa:

pakolämpötila = 350 °C

äänen nopeus = 500 m/s

ilman tiheys = 0,566 kg/m³.

8.4.1 Kylmäverifioinnin mittaustulokset

16.8.2017 suoritettiin uuden CSS-vaimentimen vaimennusmittaus Vöyrillä JTK Power Oy:n tuotantotiloissa. Äänenvaimennin asennettiin kahden putken väliin. Toisen putken päähän asetettiin kaiutin, joka suunnattiin putken sisälle (Kuva 14). Kaiuttimen tehtävänä oli toistaa valkoista kohinaa vahvistimen kautta. Vaimentimen vaimennus mitattiin huoneenlämmössä kuudella mikrofonilla. Mittaus havaitsi ja eliminoi myös päätyheijastukset, jolloin tulokseksi saatiin Transmission Loss. Kylmäverifioinnin tulokset eivät lämpötilakompensoinnista huolimatta vastanneet suunniteltuja arvoja.



Kuva 14. Uuden CSS-vaimentimen mittaus valkoisella kohinalla.

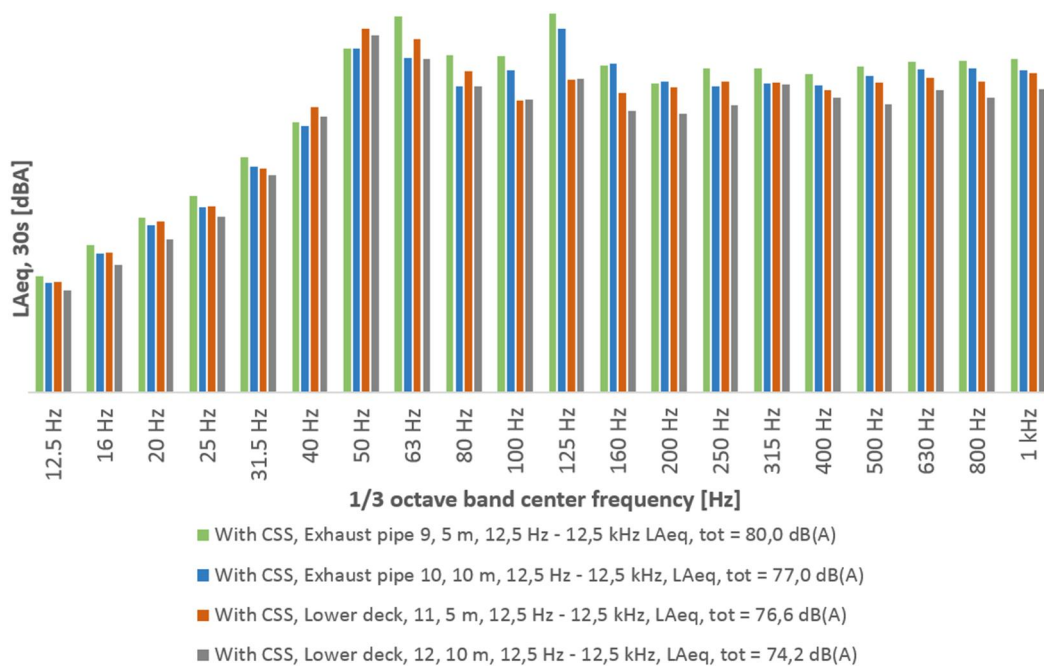
8.5 Lopullisen melutason mittaus kahdella äänenvaimentimella

CSS-äänenvaimennin asennettiin alukseen Norjassa Fitjarin telakalla tammikuussa 2018. 24.1.2018 suoritettiin Wärtsilän toimesta asennuksen jälkeinen käyttöönottoon liittyvä pakomelumittaus. Tarkoituksena oli saada todellinen vaimennustaso ja vaimennuksen onnistuminen selville. Melu mitattiin samalla tavalla kuin vuoden 2016 lähtötasomittaus, jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia. Kuorma merimatalla mittauksen aikana oli noin 70–75 % kierrosnopeudella 735 RPM. Apumootorit olivat käynnissä kaikkien mittauksien aikana.

Sää heikkeni mittauksien aikana nopeasti ja olosuhteet muuttuivat erittäin tuulisiksi. Mittaukset jouduttiin keskeyttämään myrskytuulen vuoksi, joka oli mittauksien lopettamisen jälkeen noin 21–22 m/s. Tärkeimmät mittaukset ehdittiin kuitenkin suorittamaan ajettaessa myötätuuleen, jolloin tuuli oli lievempi. Tarpeellinen mittausdata kerettiin kuitenkin saamaan analysointia varten. On kuitenkin huomioitava, että voimakas tuuli vaikuttaa melumittauksiin huomattavasti nostamalla taustamelutasoa.

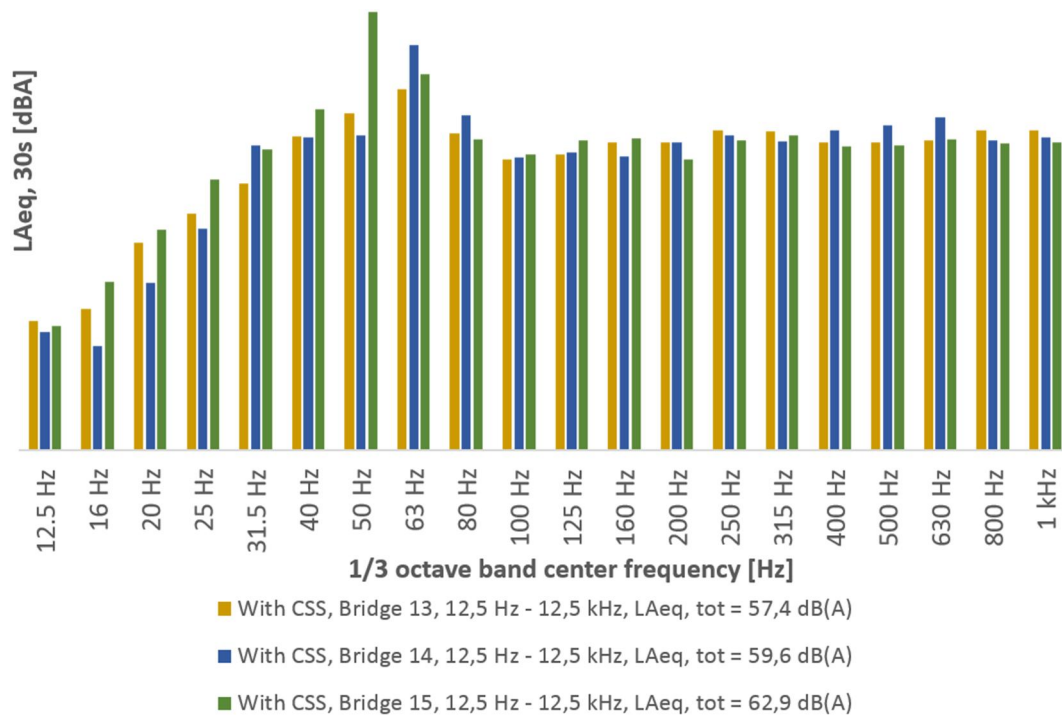
8.5.1 Kuumaverifioinnin mittau tulokset

Kuviossa 7 ovat pisteiden 9, 10, 11 ja 12 terssikaistojen melutasot jakautuneet varsin tasaisesti. A-painotettuna sijoittuu suurin äänienergia 50:n hertsin terssikaistalle. Pisteissä 9 ja 10 ovat heijastukset laivan rakenteista tai toinen äänilähde mahdollisesti kasvattaneet 125:n hertsin äänitasoja.



Kuvio 7. A-painotettu 30 sekunnin 1/3-oktaavianalyysi kahdella vaimentimella mittauspisteistä 9, 10, 11 ja 12.

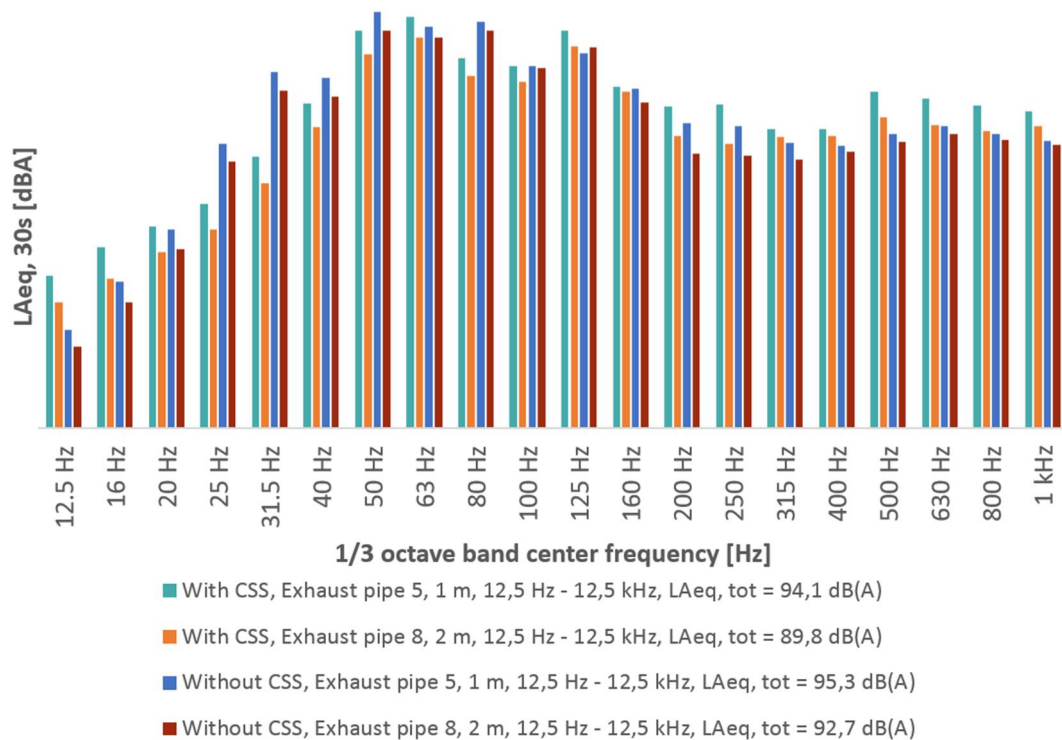
Kuviossa 8 on komentosillalla mitatut pisteet 13, 14 ja 15. Taajuuskäyrässä on mittauspisteen 15 kohdalla todennäköisesti seisovista aalloista johtuva 50:n hertsin äänitason nousu, sillä 50:n hertsin aallonpituus on kyseisissä olosuhteissa vajaa 7 m. Tämän merkittävän eron äänenpainetasossa kuuli myös itse mittauksien yhteydessä. Seisova aalto osui juuri mittauspiste 15:n kohdalle, ja muutos äänessä oli huomattava jo yhden tai kahden askeleen matkalla. Seisovien aaltojen aiheuttama äänenvoimakkuuden ero voi siis olla merkittävä jo metrin murto-osien matkalla, joten myös pienet paikkaerot mittauksissa voivat vaikuttaa mittauksitulokseen. Mittauspiste 14 on keskellä komentosiltaa reilun viiden metrin etäisyydellä seinästä, joten 63:n hertsin melupiikki on myös mahdollisesti aiheutunut seisovista aalloista (aallonpituus noin 5,5 m).



Kuvio 8. A-painotettu 30 sekunnin 1/3-oktaavianalyysi kahdella vaimentimella mittauspisteistä 13, 14 ja 15.

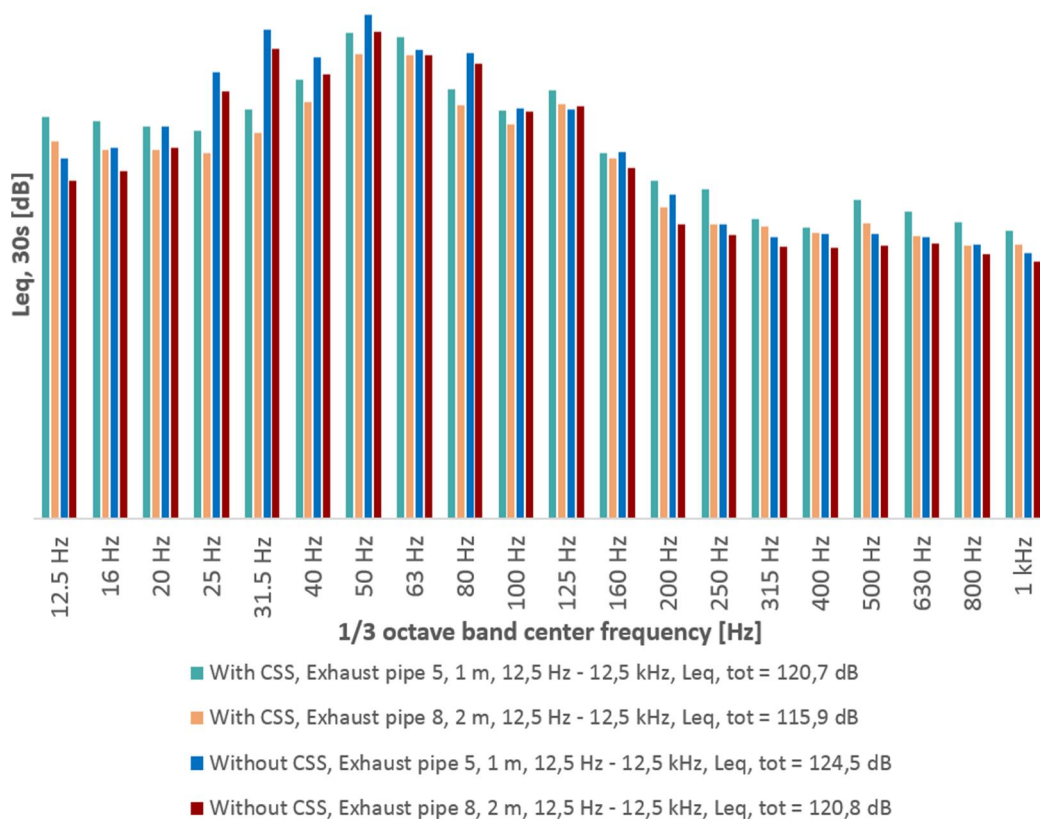
8.6 Vertailu

Pisteistä 5 ja 8 mitattujen 30 sekunnin 1/3-oktaavianalyysit osoittavat, että aiemmat 31,5:n ja 80:n hertsin melupiikit ovat vaimentuneet huomattavasti, mutta 50:n hertsin vaimennus on jäänyt heikommaksi. Myös 25:n hertsin äänitasossa on vaimennus, jonka todennäköisesti 30,6:n hertsin resonaattorin vaimennuskaista on tuottanut. 63:n hertsin 1/3-oktaavikaistalla ei ole vaimennusta, sillä yhdenkään resonaattorin vaimennuskaista tai kertaluku ei osu 63:n hertsin terssikaistalle. Voimakkaan tuulimelun huomaa pakomeluspektrin yläpuolella (200–1000 Hz) kasvaneena melutasona, esimerkiksi 500:n hertsin kohdalla. Keskiäänitasoissa on tuulesta huolimatta laskua, etenkin pisteiden 8 välillä (Kuvio 9), sillä pääsääntöisesti korkein melupiikki määrittelee kokonaisäänitason.



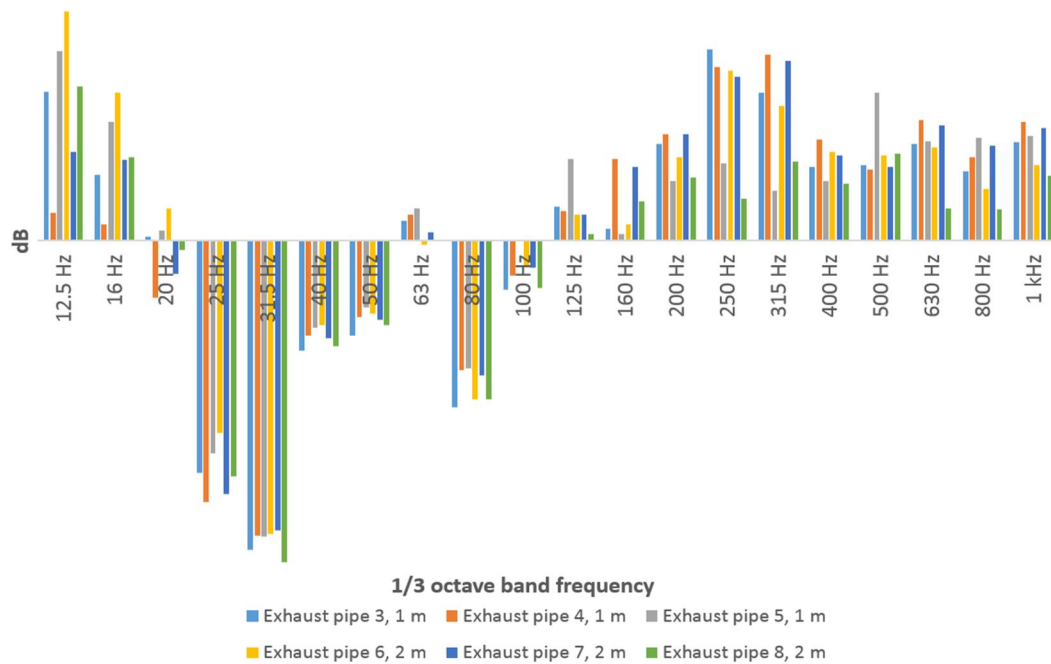
Kuvio 9. Vanhat ja uudet mittaukset A-painotettuina pisteistä 5 ja 8.

Kuviossa 9 pylväät ja kokonaisäänitaso on esitetty A-painotuksella, jolloin kokonaisäänitason lasku CSS-vaimentimen asennuksen jälkeen on pienempi (noin 1–3 dB). Lineaarisesti esitettynä (Kuvio 10) tuloksissa on suurempi ero (noin 4–5 dB). Kokonaisäänitaso on lineaarisena noin 26–30 dB korkeampi kuin A-painotettuna. Kuviossa 10 on myös nähtävissä ongelma 50:n hertsin resonaattorin kanssa. Epäonnistunut vaimennus 50:n hertsin taajuudella estää kokonaisäänitason pienenemisen.



Kuvio 10. Vanhat ja uudet mittaukset lineaarisina pisteistä 5 ja 8.

Vaimennustason tarkastelua auttaa äänenpainetason muutoksen laskeminen, jolloin uusista meluarvoista vähennetään vanhat meluarvot. Yhden ja kahden metrin etäisyyksiltä on 31,5:n hertsin vaimennus kaikista suurin (Kuvio 11). Tämä taajuus on ollut yksi eniten häiriötä aiheuttavista taajuuksista. 25:n ja 80:n hertsin vaimennukset ovat myös varsin suuria, mutta 40:n ja 50:n hertsin vaimennukset ovat hieman pienempiä. 49:n hertsin neljännesaaltoresonaattori ei toimi toivotulla tasolla, sillä 50:n hertsin vaimennus on hyvin pieni verrattuna 31,5:een ja 80:een hertsiin. Selitystä sytytystaajuuden (50 Hz) huonommalle vaimennukselle on vaikea keksiä, sillä kaikki resonaattorit on suunniteltu samoja kaavoja ja sääntöjä käyttäen. Tuulimelun huomaa matalimmilla ja korkeimmilla taajuuksilla kasvaneena melutasona.

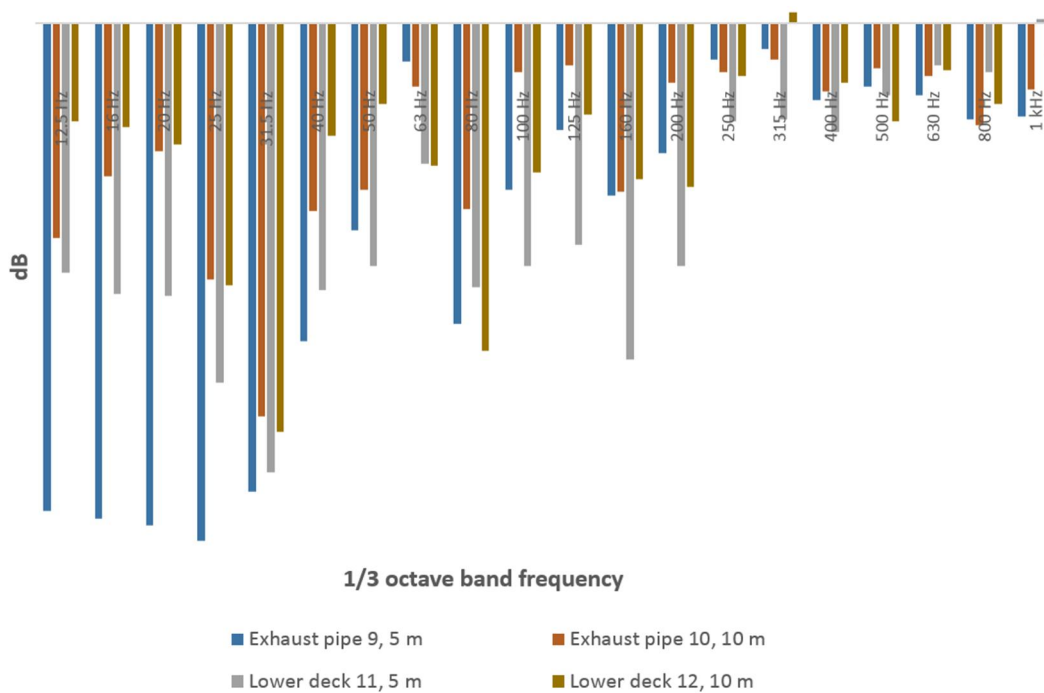


Kuvio 11. Muutos kokonaisäänepainetasossa pisteissä 3–8.

30,6:een hertsiin viritetty neljännesaaltoresonaattori toimii erinomaisesti 31,5:n hertsin terssikaistan alueella, joka on 28,2–35,5 Hz. 30,6 hertsin neljännesaaltoresonaattorin vaikuttaa myös 25:n hertsin 1/3-oktaavikaistan vaimennukseen. 25:n hertsin 1/3-oktaavikaistan taajuusalue on 22,4–28,2 Hz, jolloin ensimmäisen neljännesaaltoresonaattorin vaimennuskäyrä ylettyy myös kyseisen taajuuskaistan ylätaajuuksille. 80:n hertsin 1/3-oktaavikaista on 70,8–89,1 Hz. Tämän taajuuskaistan sisälle mahtuu sekä 80:n hertsin neljännesaaltoresonaattorin vaimennus että 30,6:n hertsin kolmannen kertaluvun, 91,8 Hz, vaimennuskäyrän yläosa. 100:n hertsin 1/3-oktaavikaistan, 89,1–112 Hz, lievä vaimennus selittyy myös 30,6:n hertsin neljännesaaltoresonaattorin kolmannen kertaluvun vaimennuskäyrällä.

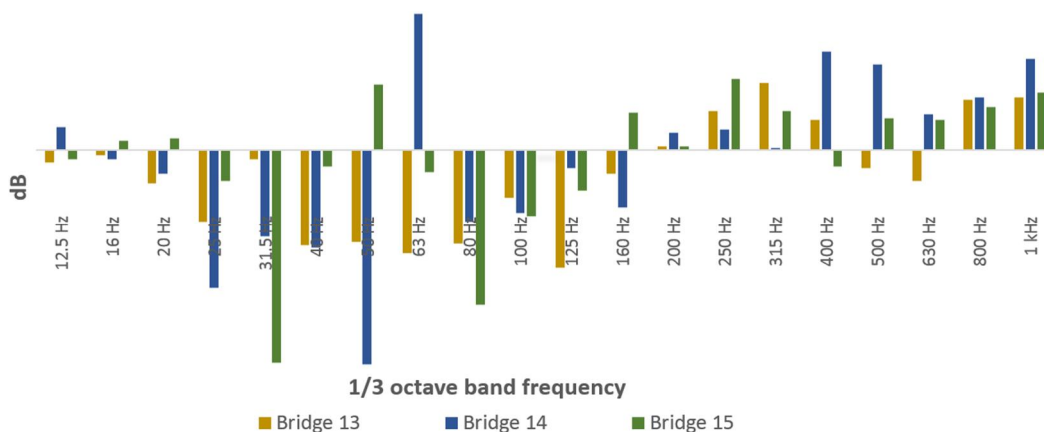
Kuviossa 12 on muutos kokonaisäänepainetasoissa viiden ja kymmenen metrin etäisyyksiltä. Sinisen palkin suuruus matalilla taajuuksilla liittyy kuvioissa 4 ja 5 esiintyneisiin mittauspisteiden 9 voimakkaisiin mataliin taajuuksiin. Vaimennus toimii parhaiten 25:n, 31,5:n ja 80:n hertsin 1/3-oktaavikaistoilla, mutta 50:n hertsin vaimennus on myös kauempaa mitattua odotettua heikompi. Pisteet 9, 10, 11 ja 12

mitataan matalammalta suojaisemmasta paikasta, jolloin tuuli ei ole päässyt vaikuttamaan mittauksiin yhtä vahvasti, kuin pisteissä 3–8. Kaikissa terssikaistoissa on kuitenkin havaittavissa selvä vaimennus.



Kuvio 12. Muutos kokonaisäänepainetasossa pisteissä 9–12.

Kuviossa 13 pisteet 13–15 kertovat komentosillalla mitattujen äänenpainetasojen muutoksen äänenvaimentimen lisäyksen jälkeen. Uuden vaimentimen neljännesaaltoresonaattoreiden suunnitellut viritystaajuudet ovat komentosillan mittauksien mukaan osuneet varsin hyvin halutuille taajuuksille. Suurimmat vähennykset kokonaisäänepainetasossa näkyvät 31,5:n, 50:n ja 80:n hertsin 1/3-oktaavikaistoilla. Epätasaiset äänitasot ovat mahdollisesti aiheutuneet seisovista aalloista. Seisovien aaltojen lisäksi on myös voimakas tuulimelu vaikuttanut mittauksiin. Miehistön mukaan melutaso komentosillalla on laskenut merkittävästi.



Kuvio 13. Muutos kokonaisäänepainetasossa pisteissä 13–15.

Terssikaista-analyysien perusteella on vaimentimen suunnittelu onnistunut kohtuullisen hyvin. Vaimentimen 30,6:n ja 79:n hertsin neljännesaaltoresonaattoreiden halutut vaimennustaajuudet ovat vaimentuneet merkittävästi. Sen sijaan 49:n hertsin neljännesaaltoresonaattori ei toimi odotetusti.

Mittauspisteiden 3 (Liite 1) ja 8 (Liite 2) kapeakaistamittaukset osoittavat, että vaimentimen viritystaajuuden laskenta on suurimmaksi osin onnistunut varsin hyvin käytetyllä päätykorjauksen arvolla. 49:n hertsin resonaattorin heikompi vaimennus voi johtua viritystaajuuden laskennan epäonnistumisesta tai resonaattorin olosuhteiden geometrisista ongelmista. Viritystaajuuden laskennan epäonnistuminen on epätodennäköisempää, sillä muut resonaattorit on viritetty oikein. Syynä voi olla pakoputkiston pää tai mutka epäsovivalla etäisyydellä resonaattorin aukosta, tai muu virtausta ja akustiikkaa häiritsevä yksityiskohta.

9 YHTEENVETO JA ARVIOINTI

9.1 Mittauksien yhteenveto

Mittauksissa meteorologiset olosuhteet poikkesivat toisistaan, mutta vaikutukset lopputulokseen olivat vähäiset. CSS-äänenvaimentimen neljännesaaltoresonaattorit viritettiin 30,6:een, 49:ään ja 79:een hertsiin. Ensimmäinen ja kolmas resonaattori toimii hyvin, sillä 31,5:n ja 80:n hertsin 1/3-oktaavikaistojen vaimennus vastaa suunniteltua tasoa. Taajuusjärjestyksessä toinen resonaattori ei saavuttanut haluttua vaimennusta, sillä 50:n hertsin 1/3-oktaavikaistan vaimennus on heikompi, eikä vaimenna suunnitellusti. Syy yhden resonaattorin toimimattomuudelle on todennäköisesti äänenvaimentimen olosuhteet tai pakoputkiston geometria.

Komentosillalla melu vaimeni miehistön mukaan huomattavasti. Tietyissä pisteissä komentosiltaa syntyi seisovia aaltoja, jotka aiheuttivat melun voimistumista. Kokonaisvaltaisesti melu komentosillalla vaimeni noin 20–125 hertsin taajuusalueella.

9.2 Työn yhteenveto

Opinnäytetyössä perehdyttiin akustiikan, pakomelun ja äänenvaimenninsuunnittelun teoriaan, jotta lukija ymmärtäisi akustiikasta keskeisimmät käsitteet ja teorat. Opinnäytetyössä esitetty teoriaosuus toimii myös kompaktina teoria-aineistona koneakustiikan ja äänenvaimennuksen perehdytyksessä.

Opinnäytetyössä tarkasteltiin yksityiskohtaisemmin CSS-vaimentimen suunniteltuja ja todellisia mitattuja vaimennusarvoja. Wärtsilän pitkäaikainen tavoite on selvittää, mitkä arvot toimivat parhaiten muun muassa päätykorjauksen laskennassa erilaisten äänenvaimentimien suunnittelussa. Opinnäytetyössä pohdittiin myös melumittauksen luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä, kuten heijastukset ja sääolosuhteet.

Jatkotutkimuksissa tulisi tehdä kokeita erilaisilla neljännesaaltoresonaattoreilla ja niiden aukoilla. Aaltoputkien aukkojen muutosten vaikutusta tulisi tutkia, sekä

tehdä kokeita eri muotoisilla aaltoputkillä. Viritystaaajuuden muuttumista tulisi päästä kokeilemaan useammalla eri aaltoputkella vakio-olosuhteissa.

9.3 Arviointi

Työ onnistui varsin hyvin, sillä tutkimuksen kohteena olleen äänenvaimentimen suorituskky saatiin tarkasti selville. Haasteita toi se, että äänenvaimennin ei toiminut täysin odotetulla tavalla, jolloin mielenkiinto keskittyi syyn pohdintaan. Mittaustuloksissa oli myös odottamattomia yksityiskohtia, jolloin syyn selvittämiseksi piti pystyä ajattelemaan laajemmin kaikkia ääneen vaikuttavia tekijöitä ja ilmiöitä.

Koneakustiikka ja äänenvaimennus oli työn tekijälle lähes kokonaan uusi aihepiiri. Tästä johtuen oli työn alku suurimmaksi osaksi itseopiskelua ja aiheeseen perehtymistä. Lopuksi aiheesta oli kuitenkin hyvin laaja ja ammattimainen tietotaso, jonka avulla työ voitiin toteuttaa. Työ olisi voitu suorittaa nopeammin, mutta asiakkaan aikataululliset syyt estivät sen. Tammikuussa 2018 suoritettu mittausmatka Norjaan oli opinnäytetyön kohokohta, sillä se antoi paremman kokonaiskuvan mittauspisteistä sekä ymmärryksen melun tasosta eri pisteissä. Tuloksien analysointi oli helpompaa, kun mittaukset oli itse suoritettu ja laivan rakenne tutumpi. Opinnäytetyö oli kokonaisuudessaan hyvin opettavainen ja mielenkiintoinen.

LÄHTEET

- /1/ Wärtsilä. Wärtsilä lyhyesti. Viitattu 12.10.2017.
<http://www.wartsila.com/fi/wartsila>
- /2/ Wärtsilä. Wärtsilän historia. Viitattu 12.10.2017.
<http://www.wartsila.com/fi/wartsila/historia>
- /3/ Bodén, H., Carlsson, U., Glav, R., Wallin, H.P. & Åbom, M. 2001. Ljud och Vibrationer. Stockholm. Norstedts Tryckeri.
- /4/ Acoustic Glossary. Viitattu 31.10.2017. <http://www.acoustic-glossary.co.uk>
- /5/ Euroopan yhteisöjen virallinen lehti. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/49/EY ympäristömelun arvioinnista ja hallinnasta. Viitattu 17.10.2017. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049&from=FI>
- /6/ European Environment Agency (EEA) Technical report No 11/2010. Good practice guide on noise exposure and potential health effects. ISBN 978-92-9213-140-1. https://www.eea.europa.eu/publications/good-practice-guide-on-noise/at_download/file
- /7/ Wärtsilä, VTT. Dieselmoottorin melun hallitseminen koneakustiikan osaamista hyödyntäen. http://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2013/08/Saine_etal.pdf
- /8/ Oksanen, S., Zengxin, G., Saine, K., Holmberg, J. & Hartikainen, J. 2016. Optimized performance, design and manufacturing of compact silencer system for engine exhaust noise. The International Council on Combustion Engines (CI-MAC).
- /9/ Oksanen, S. & Holmberg, J. 2014. Towards More Optimized Exhaust Silencer Realizations On-board Ships – Status Update on the Compact Silencer System (CSS). Baltic-Nordic Acoustics Meeting (BNAM).
- /10/ DNV Ingemansson AB. Wärtsilä Diesel Bullerkurs 1995.
- /11/ Troolari, kuva. Shipspotting. Viitattu 1.3.2018.
<http://www.shipspotting.com/gallery/photo.php?lid=2782469#>
- /12/ RION NA-28, kuva. Viitattu 1.3.2018. <http://rion-sv.com/download/catalog/NA-28>
- /13/ Brüel & Kjær 4231, kuva. Viitattu 1.3.2018.
<https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/calibrators/4231>

LIITE 1

FFT-DATA MITTAUSPISTEESTÄ 3

Liite on salattu.

LIITE 2

FFT-DATA MITTAUSPISTEESTÄ 8

Liite on salattu.